



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS -
UNIDADE ARAXÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL

**IMAGEAMENTO GEOFÍSICO APLICADO À INVESTIGAÇÃO
GEOLÓGICA DO SUBSTRATO DE UM PÁTIO DE
HOMOGENEIZAÇÃO DE MINÉRIO EM UMA MINERADORA DE
NIÓBIO**

MOACIR LUIZ DE REZENDE

ARAXÁ – MINAS GERAIS

2025

MOACIR LUIZ DE REZENDE

**IMAGEAMENTO GEOFÍSICO APLICADO À INVESTIGAÇÃO
GEOLÓGICA DO SUBSTRATO DE UM PÁTIO DE
HOMOGENEIZAÇÃO DE MINÉRIO EM UMA MINERADORA DE
NIÓBIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas – Mestrado Profissional – do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG/Campus Araxá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer*

Coorientador: Geólogo MSc. Tiago Antônio Torres Gomes**

Linha de pesquisa: Geologia de Engenharia na Mineração.

ARAXÁ – MINAS GERAIS

2025

***CEFET-MG**

****CBMM**

**ATA DA 51ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS –
MESTRADO PROFISSIONAL**

Aos 25 (vinte e cinco) dias do mês de agosto do ano de 2025 (dois mil e vinte e cinco), às 17h30min (dezessete horas e trinta minutos), através da Plataforma Microsoft TEAMS, foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação do Mestrando **Moacir Luiz de Rezende**, sob a forma totalmente remota (Resolução CPPG 08/2020, de 09/07/2020; Resolução CEPE 09/2020, de 17/11/2020), sendo a banca examinadora composta pelo **Prof. Dr. Hildor José Seer** (Presidente e Orientador) – CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - CEFET- MG, **Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto** (Membro interno) – CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - CEFET- MG, **Geólogo Dr. Rafael de Souza Rodrigues** (Membro externo) – COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO – CBMM e pelo **Geólogo MsC. Tiago Antônio Torres Gomes** (Coorientador) – COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO – CBMM. Dando início aos trabalhos o Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as Sessões de Defesa de Dissertação, concedeu ao Mestrando **Moacir Luiz de Rezende**, até 40 (quarenta) minutos para a apresentação do seu trabalho intitulado “**Imageamento geofísico aplicado à investigação geológica do subsolo de um pátio de homogeneização de minério em uma mineradora de nióbio**”, na Área de Concentração: *Engenharia de Minas* e Linha de Pesquisa *Geologia de Engenharia na Mineração*. Terminada a exposição, o Presidente da Banca examinadora passou a arguição do candidato aos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, o Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que o Mestrando foi **aprovado** por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo Mestrando.

Araxá, 25 de agosto de 2025

Hildor José Seer
Orientador - CEFET-MG

Thiago Bomjardim Porto
Membro interno – CEFET-MG

Rafael de Souza Rodrigues
Membro externo - CBMM

Tiago Antônio Torres Gomes
Coorientador - CBMM

Moacir Luiz de Rezende
Discente PPGEMIN

R467i Rezende, Moacir Luiz de
Imageamento geofísico aplicado à investigação geológica do substrato de um pátio de homogeneização de minério em uma mineradora de Nióbio / Moacir Luiz de Rezende. – 2025.
120 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer.
Coorientador: MSc. Tiago Antônio Torres Gomes.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2025.

Bibliografia.

1. Geologia estrutural – Teses. 2. Prospeção – Métodos geofísicos – Teses. 3. Geotecnia – Teses. I. Seer, Hildor José. II. Gomes, Tiago Antônio Torres. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 551.243

Dedico esse trabalho à minha família, Eliane
Diuly e Diuare, pelo apoio de sempre.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e pelas conquistas pessoais e profissionais.

Agradeço a CBMM pela oportunidade e apoio, em especial ao Marcelo Pereira que acreditou no trabalho e disponibilizou recursos para a investigação geofísica, ao Gláucio Castro pelo apoio na reta final, me liberando para trabalhar em *home office* um dia da semana para terminar o texto. Ao André Reis pelos desenhos das interpolações de dados no *Deswik*. A todos os colegas de trabalho que direta e indiretamente contribuíram para esse trabalho.

Ao pessoal da empresa Alta Resolução, nas pessoas do Adriano Marchioreto e Marcos Sousa, pelos serviços prestados de imageamento geofísico.

Especiais agradecimentos à minha esposa Eliane por ser minha companheira de todas as horas, que sempre me incentivou, me apoiou e que, com sua fé inabalável, rezou e agradeceu a Deus por nossas lutas e conquistas. Aos meus filhos, Diuly e Diuare, que também me apoiaram e me incentivaram a buscar conhecimento e crescimento profissional.

“Precisamos estar dispostos a nos livrar da vida que planejamos, para podermos viver a vida que nos espera. A pele velha tem que cair para que uma nova possa nascer.”

Joseph Campbell

RESUMO

Em uma mineradora de nióbio no Complexo Alcalino-carbonatítico de Araxá (MG), o pátio de homogeneização de minério, operado por máquinas de grande porte (*Stacker* e *Reclaimer*), apresentou desníveis nos trilhos devido a um possível recalque no aterro compactado. Diante de problemas estruturais e falhas prematuras nos equipamentos, foi necessário investigar melhor o aterro. Após investigação da construção do aterro através de inspeções e consultas dos relatórios de acompanhamento da construção incluindo medidores de recalque, constatou-se que o aterro não sofreu recalque e suspeitou-se que o subsolo sofreu acomodações. Nesse contexto o foco do estudo passou a ser o subsolo da área existente e de futura expansão do pátio. Este estudo empregou métodos geofísicos não destrutivos – eletrorresistividade e sísmica (MASW) – para caracterizar o subsolo, correlacionando os dados com a geologia local e ensaios prévios de resistência do solo (SPT). Os resultados identificaram uma zona com estratos de baixa resistividade, fraturas, falhas geológicas e percolação de fluidos, justamente na região onde o aterro foi construído.

Palavras-chave: Eletrorresistividade; MASW; SPT; pátio de homogeneização de minério; imageamento geofísico; geotecnia.

ABSTRACT

At a niobium mining company in the Araxá Alkaline-Carbonatite Complex (MG), the ore homogenization yard, operated by large machines (stackers and reclaimers), experienced uneven tracks due to possible settlement in the compacted backfill. Given structural problems and premature equipment failures, further investigation of the landfill was necessary. After investigating the landfill construction through inspections and consulting construction monitoring reports, including settlement meters, it was found that the landfill had not experienced settlement, and it was suspected that the subsurface had been settled. In this context, the focus of the study shifted to the subsurface of the existing and future expansion areas of the yard. This study employed non-destructive geophysical methods—electrical resistivity and seismic (MASW)—to characterize the subsurface, correlating the data with local geology and previous soil resistance tests (SPT). The results identified an area with low resistivity strata, fractures, geological faults and fluid percolation, precisely in the region where the landfill was built.

Keywords: *Electrical resistivity; MASW; SPT; Ore Homogenization Yard; Geophysical imaging; Geotechnics.*

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASP - *Academic Search Premier*

BU - Bases de Dados em Engenharias

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

DC - Corrente Contínua

GPS - Sistema de Posicionamento Global

MASW - *Multichannel Analysis of Surface Waves*

SciELO - *Scientific Electronic Library Online*

VLF - *Very Low Frequency*

SIG - Seção de Imageamento Geométrico

NEHRP - *National Earthquakes Hazard Reduction Program* (Programa Nacional de Redução de Riscos Sísmicos)

SPT - *Standart Penetration Test*

Ohm.m – Unidade de medida da resistividade em ohm por metro.

Solo *insitu* – Solo natural, sem interferência de movimentação (escavação ou aterro).

EVM's – Extensômetros Verticais Magnéticos

Truck – Conjunto motriz das máquinas de patio (Stacker e Retomadora)

Stacker – Máquina de pátio (Empilhadeira em inglês) destinada a formar pilhas de minério homogeneizadas.

Retomadora – Máquina de pátio destinada à retomada das pilhas de minério homogeneizadas

ISRM – *International Society for Rock Mechanics*

CACA – Complexo Alcalino-carbonatítico de Araxá

V_p – velocidade de propagação da onda longitudinal (m/s)

V_s – velocidade de propagação da onda transversal (m/s)

ρ – massa específica do material (g/cm³)

ν – coeficiente de *Poisson* (adimensional)

G – módulo de cisalhamento ou módulo de rigidez (Pa)

E – módulo de elasticidade ou módulo de *Young* (Pa)

Índice

1. INTRODUÇÃO	24
2. OBJETIVOS DA INVESTIGAÇÃO.....	26
2.1. O PROBLEMA-QUESTÃO DE PESQUISA	26
2.2. HISTÓRICO DO RECALQUE E DANOS ESTRUTURAIS.....	28
2.3. A JUSTIFICATIVA	32
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
3.1. METODOLOGIA CIENTÍFICA.....	34
3.2. INTRODUÇÃO AO MÉTODO DE ELETORRESISTIVIDADE	35
3.3. FUNDAMENTOS DA ELETORRESISTIVIDADE	37
3.4. APLICAÇÕES DO MÉTODO DE ELETORRESISTIVIDADE	39
3.5. METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	41
3.6. LIMITAÇÕES DO MÉTODO	43
3.7. AVANÇOS TECNOLÓGICOS E INOVAÇÕES	45
3.8. O MÉTODO SÍSMICO MASW	47
3.9. A GEOLOGIA LOCAL	54
3.9.1. Resistência dos materiais no local do estudo.....	57
3.9.2. Fraturas e falhas no local do estudo.....	60
4. METODOLOGIA	65
4.1. TRABALHOS DE CAMPO.....	65
4.2. EQUIPAMENTOS DO LEVANTAMENTO ELETORRESISTIVO	68
4.3. EQUIPAMENTOS DO LEVANTAMENTO SÍSMICO.....	69
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
5.1. LEVANTAMENTO ELETORRESISTIVO	73
5.1.1. Premissas do Modelo Geoelétrico	73
5.1.2. Correlação das Resistividades com os Tipos de Materiais.....	74
5.1.3. Seções de Imageamentos Geoelétricos (SIG's).....	79
5.1.4. Interpretação dos Resultados Geoelétricos	87
5.2. LEVANTAMENTO SÍSMICO MASW	88

5.2.1. Premissas do Modelo Sísmico.....	88
5.2.2. Correlação dos Valores de Vs com os materiais	89
5.2.3. Apresentação e Módulo de Cisalhamento.....	91
5.2.4. Perfis Sísmicos de Vs.....	93
5.2.5. Interpretação dos Resultados Sísmicos.....	94
5.3. INTERPOLAÇÃO DAS SEÇÕES DE IMAGEAMENTO GEOELÉTRICO COM SPT'S	95
5.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CAMPO	101
6. CONCLUSÃO	113
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	114
8. CRONOGRAMA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
9. REFERÊNCIAS	116

Lista de Figuras

Figura 1-1: Mapa de localização do Complexo Alcalino-carbonatítico de Araxá e área do estudo. Fonte: Autor (2025).....	25
Figura 2-1: Pátio de homogeneização em planta com indicação de aterro. Fonte: Autor (2024).	27
Figura 2-2: Pátio de homogeneização com indicação de corte e aterro – Corte A-A figura 2-1. Fonte: Autor (2024).....	27
Figura 2-3: Recalque dos trilhos da Empilhadeira (Stacker). Fonte: Autor (2024).....	29
Figura 2-4: Recalque dos trilhos da Empilhadeira (Stacker) – comparativo entre corte e aterro. Fonte: Autor (2024).....	29
Figura 2-5: Fotos com evidências das falhas dos trucks da Empilhadeira (Stacker) mostrando rodas com bordas desgastadas e rolamentos quebrados prematuramente. Fonte: Autor (2024).	30
Figura 2-6: Controle de manutenção dos trucks da Empilhadeira (Stacker). Fonte: Autor (2024).	30
Figura 2-7: Evidência das trincas e rachaduras da base civil dos trilhos da Empilhadeira (Stacker). Fonte: Autor (2024).	31
Figura 2-9: Ilustração das correções de trincas e rachaduras da base civil dos trilhos da Empilhadeira (Stacker). Fonte: Autor (2024).....	32
Figura 2-8: Evidência do desnível dos trilhos da Empilhadeira (Stacker). Fonte: Autor (2024).	32
Figura 3-1: Exemplo de curva de dispersão típica (a) e o modelo 1D interpretado (b) que melhor ajustou a esta curva (espessuras e velocidades da onda S). Fonte: Autor (2023).	51
Figura 3-2: Composição das várias bases MASW 1D (B1 a B7, neste caso), para gerar o perfil 2D executado ao longo de um alinhamento (roll-along). Fonte: Autor (2023).	52
Figura 3-3: Configuração Geológica do Complexo Alcalino do Barreiro. Fonte: Modificado de Biondi (2003).	55

Figura 3-4: Modelo geológico tridimensional mostrando exemplos de furos de sonda de cada litotipo. (a) Solos; (b) e (c) Alteritos laranja e marrom; (d) Saprolitos; (e) Rocha carbonatítica sã; (f) Quartzitos fenitizados; (g) Xistos alterados/fraturados; (h) Xistos não alterados. Fonte: GOMES (2017). 57

Figura 3-5: (a) Classificação R01; (b) Classificação R02; (c) Classificação R03. Fonte: Adaptado de LIMA, 2024. 58

Figura 3-6: Mapa de horizonte intempérico x resistência Fonte: LIMA (2024). 59

Figura 3-7: Classificação de resistência dos pontos mapeados. Fonte: LIMA (2024). 60

Figura 3-8 Pontos no anel de quartzitos fenitizados do CACA (P1 e P2), alvos de levantamentos realizados com o objetivo de obter as direções preferenciais das estruturas rúpteis. Fonte: Autor (2025). 62

Figura 3-9: Diagrama de rosetas P1. Para localização ver figura 6.28. Fonte: GOMES (2020). 63

Figura 3-10: Diagrama de rosetas P2. Para localização ver Figura 6-28. Fonte: Relatório Interno (2022). 64

Figura 4-1: Área de estudo. Fonte: Autor (2025). 66

Figura 4-2: Mapa topográfico da região de estudo (destacando a área de estudo retângulo vermelho), com as curvas de níveis. Fonte: Autor (2025). 67

Figura 4-3: Syscal Switch Pro - Eletroresistivímetro digital multi-eletrodo utilizado durante a aquisição. Fonte: Autor (2023). 68

Figura 4-4: Diagrama de aquisição de dados na área de estudo do alinhamento L1. Fonte: Autor (2023). 69

Figura 4-5: Sismógrafo GEODE e notebook utilizados nos trabalhos. A tela do computador apresenta o software que controla e gerencia a coleta dos dados sísmicos, permitindo o controle de qualidade. Fonte: Autor (2023). 70

Figura 4-6: Exemplo de aquisição dos dados MASW com uso de uma base fixa, onde sucessivos pontos de geração das ondas sísmicas (8 pontos de tiro walk-away) de forma a ser possível extrair perfis 1D a cada 10 m, utilizados para geração das seções MASW 2D. Fonte: Autor (2023). 70

Figura 4-7: Esquema exemplificando diferentes casos de aplicação do método sísmico MASW. Fonte: Adaptado de Kansas Geological Survey, SurfSeis/MASW Workshop (2014).	72
Figura 5-1: Compilados dos intervalos de resistividade elétrica para diferentes tipos de materiais que compõe a subsuperfície da Terra. Fonte: Relatório interno (2023).	75
Figura 5-2: Compilados dos intervalos de resistividade elétrica para diferentes tipos de materiais que compõe a subsuperfície da Terra. Fonte: Relatório interno (2023).	76
Figura 5-3: Compilados dos intervalos de resistividade elétrica para diferentes tipos de materiais que compõe a subsuperfície da Terra. Fonte: Relatório interno (2023).	77
Figura 5-4: Valores de resistividade elétrica para rocha granítica determinados por alguns autores, em diferentes locais. Fonte: Relatório interno (2023).	77
Figura 5-5: Escala cromática das resistividades elétricas utilizadas nas Seções de Imageamento (valores em Ohm.m). Fonte: Relatório interno (2023).	78
Figura 5-6: Síntese das informações apresentadas nas legendas das seções. Fonte: Relatório interno (2023).	78
Figura 5-7: Seção de Imageamento Geoeletrico L1. Fonte: Relatório interno (2023).	80
Figura 5-8: Seção de Imageamento Geoeletrico L2 Fonte: Relatório interno (2023).	81
Figura 5-9: Importante diferenciação no comportamento dos estratos geoeletricos da progressiva 0 até 840 m, para o trecho posterior a progressiva 840 m. Fonte: Relatório interno (2023).	82
Figura 5-10: Seção de Imageamento Geoeletrico (SIG L8). Fonte: Relatório interno (2023).	83
Figura 5-11: Interseção da SIG L8 com o anel de quartzito do CACA. Fonte: Autor (2025).	83
Figura 5-12: Seção de Imageamento Geoeletrico (SIG L9). Fonte: Relatório interno (2023).	84
Figura 5-13: Seção de Imageamento Geoeletrico (SIG L9). Fonte: Relatório interno (2023).	85

Figura 5-14: Interseção da SIG L11 com o anel de quartizito do CACA. Fonte: Autor (2025). Fonte: Autor (2025).	86
Figura 5-15: Seção de Imageamento Geoelétrico (SIG T1). Fonte: Relatório interno (2023).	87
Figura 5-16: Escala cromática com os intervalos de velocidade sísmica da onda cisalhante Vs. Passos a cada 50 m/s. Fonte: Relatório interno (2023).	89
Figura 5-17: Classificação preliminar dos materiais da subsuperfície através do critério das faixas de velocidades da onda cisalhante (Vs). Fonte: Relatório interno (2023).	91
Figura 5-18: Legenda apresentada para os perfis sísmicos Vs. Fonte: Relatório interno (2023).	92
Figura 5-19: Perfis de Vs T1 a T5. Fonte: Relatório interno (2023).	94
Figura 5-20: Seção de Imageamento Geoelétrico L2 com interpolação dos furos SPT's. Fonte: Autor (2025).	96
Figura 5-21: Seção de Imageamento Geoelétrico L9 com interpolação dos furos SPT's. Fonte: Autor (2025).	96
Figura 5-22: Seção de Imageamento Geoelétrico L9 com interpolação dos furos (SPT-66 e 72) e limites entre horizontes de consistência/compacidade. Fonte: Autor (2025).	97
Figura 5-23: Seção de Imageamento Geoelétrico L9 com interpolação dos furos (SPT-78 e 84) e limites entre horizontes de consistência/compacidade. Fonte: Autor (2025).	98
Figura 5-24: Seção de Imageamento Geoelétrico L9 com interpolação do furo SPT-90 e limites entre horizontes de consistência/compacidade. Fonte: Autor (2025).	99
Figura 5-25: Seção de Imageamento Geoelétrico L2 com interpolação dos furos SPT-76 e 82 e limites entre horizontes de consistência/compacidade. Fonte: Autor (2025).	100
Figura 5-26: Seção de Imageamento Geoelétrico L2 com interpolação do furo SPT-88 e limites entre horizontes de compacidade. Fonte: Autor (2025).	101
Figura 5-27: Modelo tridimensional das seções criado para melhor entendimento dos estratos geoelétricos na região do aterro compactado. Fonte: Autor (2025).	102

Figura 5-28: Local de estudo com a interpolação das seções de imageamento geoeletricos, em 3D e os dois pontos de mapeamento de fraturas com seus respectivos diagramas de rosetas. Fonte: Autor (2025)..... 103

Figura 5-29: Exposição do anel de quartzitos fenitizados mapeado no ponto 2. a) quartzitos sotopostos a camada de solo; b) fraturamento do quartzito. Fonte: Relatório interno (2020). 103

Figura 5-30: Vista geral em perspectiva da projeção das principais famílias de fraturas nas seções de imageamento geoeletricos, em 3D. Planos de fraturas em azul, referentes ao ponto de mapeamento 1 e planos de fraturas em laranja, referentes ao ponto de mapeamento 2. Fonte: Autor (2025). 104

Figura 5-31: Família das fraturas principais, com azimute de 5°, mapeadas nos pontos de 1 e 2, projetadas no modelo de imageamento geoeletrico. Fonte: Autor (2025)..... 105

Figura 5-32: Planos de fraturas com azimute de 5°, mapeadas nos pontos 1 e 2, distribuídos na área de estudo, convergentes com estruturas das Seções Geoeletricas. Fonte: Autor (2025). 106

Figura 5-33: Famílias de fraturas secundárias, com azimute de 35°, mapeadas no ponto 1 e 2, projetadas no modelo. Fonte: Autor (2025)..... 107

Figura 5-34: Famílias de fraturas secundárias, com azimute de 35°, em outra perspectiva, em que os dois planos cortam perpendicularmente zonas de falhas subverticalizadas na SIG L1, SIG L7 e SIG L9. Fonte: Autor (2025). 107

Figura 5-35: Família de fraturas secundárias, com azimute de 75°, mapeadas no ponto 1 e projetadas no modelo de imageamento geoeletrico, evidenciando que suas direções coincidem com fluxos de fluidos detectados no modelo. Fonte: Autor (2025)..... 108

Figura 5-37: Família de fraturas secundárias, com azimute de 90°, mapeadas no ponto 1 e 2, projetadas no modelo de imageamento geoeletrico, evidenciando que suas direções coincidem com fluxos de fluidos detectados no modelo. Fonte: Autor (2025)..... 109

Figura 5-36: Família de fraturas secundárias em perspectiva diferente da figura anterior, com azimute de 75°, mapeadas no ponto 1 e 2, projetadas no modelo de imageamento geoeletrico. Fonte: Autor (2025). 109

Figura 5-38: Família de fraturas secundárias em perspectiva diferente da figura anterior, com azimute de 90° , mapeadas no ponto 1 e 2, projetadas no modelo de imageamento geoeletrico. Fonte: Autor (2025). 110

Figura 5-40: Plano de família de fraturas secundárias em perspectiva diferente da figura anterior, com azimute de 135° , mapeadas no ponto 2, projetadas no modelo de imageamento geoeletrico. Fonte: Autor (2025). 111

Figura 5-39: Plano de família de fraturas secundárias, com azimute de 135° , mapeadas no ponto 2, projetadas no modelo de imageamento geoeletrico, evidenciando que suas direções coincidem com fluxos de fluidos detectados no modelo. Fonte: Autor (2025)..... 111

Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Recalques máximos medidos nos trilhos da Empilhadeira.	29
Tabela 3-1: Resistividades elétricas em Ohm.m para diferentes materiais conhecidos (Adaptado de Orellana, 1972).	36
Tabela 4-1 - Extensões dos alinhamentos geoeletricos implantados na área do Pátio de Homogeneização	71
Tabela 4-2: Extensões dos alinhamentos sísmicos implantados na área do Pátio de Homogeneização.	71
Tabela 5-1: Classificação sísmica das localidades de acordo com o intervalo de velocidade das ondas cisalhantes Vs (Programa Nacional de Redução de Riscos Sísmicos dos Estados Unidos).	90
Tabela 5-2: Apresentação do perfil sísmico Vs 1D do alinhamento L1 (progressiva 25 m), apresentando os valores de Vs e das estimativas de G_0	92

1. INTRODUÇÃO

Os diferentes materiais que compõem a superfície e subsuperfície da Terra (solos e rochas) apresentam características físicas distintas, já bastante estudadas e conhecidas no meio científico (Orellana, 1972). Dentre elas, ressalta-se a capacidade que os materiais apresentam de conduzir corrente elétrica, condutividade elétrica, ou seu inverso, resistividade elétrica.

Diferentes solos e rochas apresentam contrastes nos valores das resistividades e, apesar da grande variabilidade, os diferentes materiais e estruturas presentes no subsolo podem ser identificados por esta propriedade física (Machado, 2008). Além disso, este conhecimento pode ser ampliado pela utilização do método sísmico da Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW), do inglês *Multichannel Analysis of Surface Waves*.

Em uma mineradora do Triângulo Mineiro, em Minas Gerais que explora nióbio no Complexo Alcalino-carbonatítico de Araxá (Figura 1-1), existe um pátio de homogeneização de minério, com uma estrutura de trilhos que sofreu desníveis que variaram de +10 a -50 cm.

Em uma parte desta área, onde máquinas que formam e retomam pilhas de minério, os desníveis identificados sugeriram que pudesse ter ocorrido também um recalque do maciço onde há um aterro, o que requereu um estudo para identificar as possíveis causas.

Nesse contexto, esse trabalho traz um estudo sobre esse aterro e substrato onde foi construído, com seu histórico de construção, utilizando os métodos de eletrorresistividade e sísmica (MASW) com o objetivo de conhecer o subsolo da área onde foi construído, onde as atuais edificações estão e onde serão construídas edificações futuras.

Essa dissertação traz o problema-questão de pesquisa com seu histórico, os objetivos da investigação que foi embasada em literaturas pertinentes ao tema sobre imageamento geofísico – com os métodos de eletrorresistividade e sísmica – como referências, abordando a metodologia e materiais utilizados nos trabalhos de campo, apresentando as análises dos resultados dos métodos empregados com os resultados de campo e a conclusão.

Não obstante, foram feitas também as considerações finais e recomendações que, na visão do autor, são de grande importância para tomadas de decisão sobre a resolução do problema, embasadas em um estudo mais detalhado sobre a região onde estão as estruturas citadas e as futuras instalações.

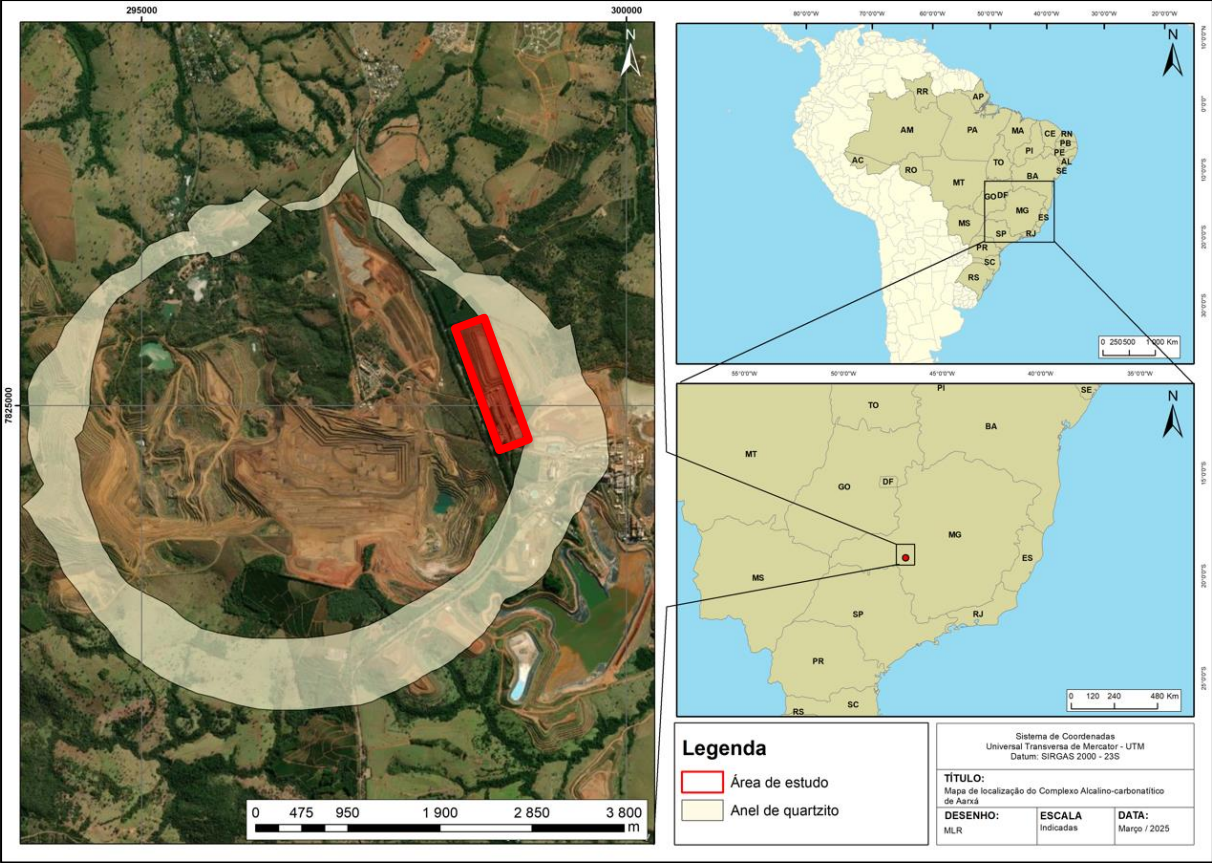


Figura 1-1: Mapa de localização do Complexo Alcalino-carbonatítico de Araxá e área do estudo. Fonte: Autor (2025).

2. OBJETIVOS DA INVESTIGAÇÃO

O objetivo desse trabalho, diante do histórico do recalque, foi estudar o subsolo e suas estruturas na região atual das pilhas de minério a fim de entender sua geologia e comportamento geotécnico e prevenir que o atual problema se repita na área de expansão. E para que esse objetivo fosse alcançado, foram consideradas as seguintes ações:

- Realização de um estudo geofísico, aplicando os métodos não destrutivos de eletrorresistividade e o método sísmico de MASW para testar se os resultados desses métodos indicam algo que corroboram para o recalque do maciço;

- Análise do modelo geológico gerado pelos métodos propostos e comparação desse modelo aos dados de sondagem da região do estudo, coletados antes da execução do aterro para a implantação do Pátio de Homogeneização;

- Apresentação do resultado do estudo e recomendações para os times de engenharia, manutenção e produção, para proposição de ações com o objetivo de resolver o problema atual e ações preventivas para a expansão do pátio de homogeneização de minério.

2.1. O problema-questão de pesquisa

A área onde as pilhas são formadas é composta por solo *insitu* que compõe a maior área e outra área menor composta por aterro apropriado, como mostra a Figura 2-2 e Figura 2-1, construído conforme as seguintes normas técnicas inerentes, à época:

- **NBR-6484 (ABNT/2020)** – Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio;
- **NBR-8036 (ABNT/1993)** – Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações;
- **NBR-6502 (ABNT /1995)** – Rochas e Solos;
- **NBR-6497 (ABNT /1983)** – Levantamento Geotécnico;
- **NBR-6122 (ABNT /1996)** – Projeto e Execução de Fundações.

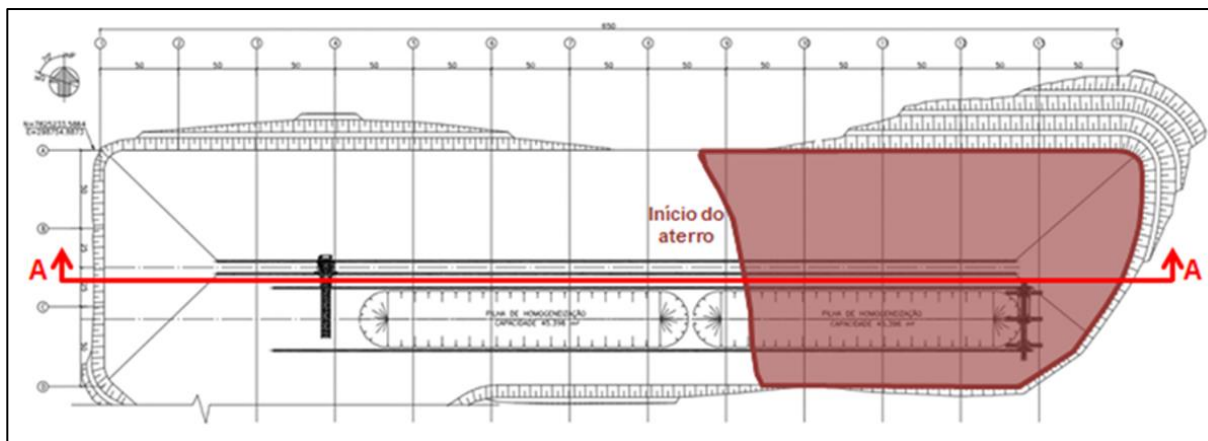


Figura 2-2: Pátio de homogeneização em planta com indicação de aterro. Fonte: Autor (2024).

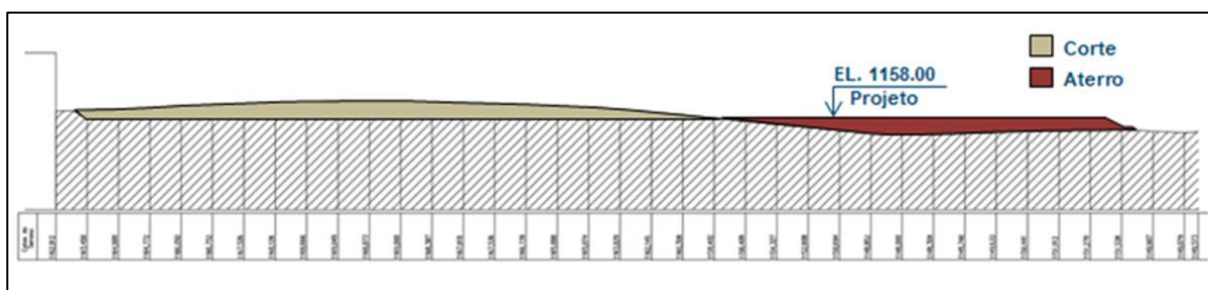


Figura 2-1: Pátio de homogeneização com indicação de corte e aterro – Corte A-A figura 2-1. Fonte: Autor (2024).

Com o passar dos anos, após o início das operações detectou-se, através de monitoramento de nivelamento e alinhamento dos trilhos das máquinas do pátio, que essa estrutura sofreu uma deformação/desnível em vários pontos ao longo do Pátio, tanto na área de corte (solo *in situ*), quanto na área de aterro.

Em consulta ao acervo de documentos referente à construção do aterro e das edificações na área de estudo e inspeções em campo, foram analisados os relatórios internos RS-G – 032/2009 referente a Sondagem de Simples Reconhecimento, com SPT (2009) e os relatórios referentes a Instrumentação de Acompanhamento de Aterro – medições feitas por EVM's (Extensômetros Verticais Magnéticos) – gerados entre julho de 2010 e dezembro de 2012, sendo eles: RIS-SP-254/10; RIS-SP-0125/11; RIS-SP-044/11; RIS-SP-164/11; RIS-SP-182/11; RIS-SP-210/11; RIS-SP-239/11; RIS-SP-258/11; RIS-SP-317/11; RIS-SP-026/12; RIS-SP-059/12; RIS-SP-110/12; RIS-SP-221/12; RIS-SP-250/12 e RIS-SP-321/12. Após análises preliminares, observou-se que não houve irregularidades na construção do aterro, devido aos

dados dos relatórios de construção e extensômetros magnéticos, além de inspeções topográficas e visuais pela área de engenharia.

Para investigar o problema, fez-se necessário um estudo mais detalhado do substrato do solo, com a suspeita de interferências geológicas mais profundas. Antes da construção do Pátio de Homogeneização, foram feitas Sondagens de Simples Reconhecimento, com SPT, realizadas no local do aterro e corte no terreno para terraplenagem, cujos objetivos eram aplicações na engenharia civil como determinação dos tipos de solo e suas respectivas profundidades de ocorrência, a posição do nível d'água e os índices de resistência à penetração (N) a cada metro.

2.2. Histórico do recalque e danos estruturais

A área onde as pilhas são formadas, conforme já citado no item 2.1, é composta por solo *in situ* que compõe a maior área e outra área menor composta de aterro compactado.

O recalque ocorreu em toda a área do pátio, com variações verticais dos trilhos da Empilhadeira de minério e da Retomadora, evidenciados nos perfis ilustrativos da Figura 2-3 e Figura 2-4 da Empilhadeira. Tais perfis foram criados a partir de monitoramentos topográficos de nivelamento dos trilhos das respectivas máquinas de pátio.

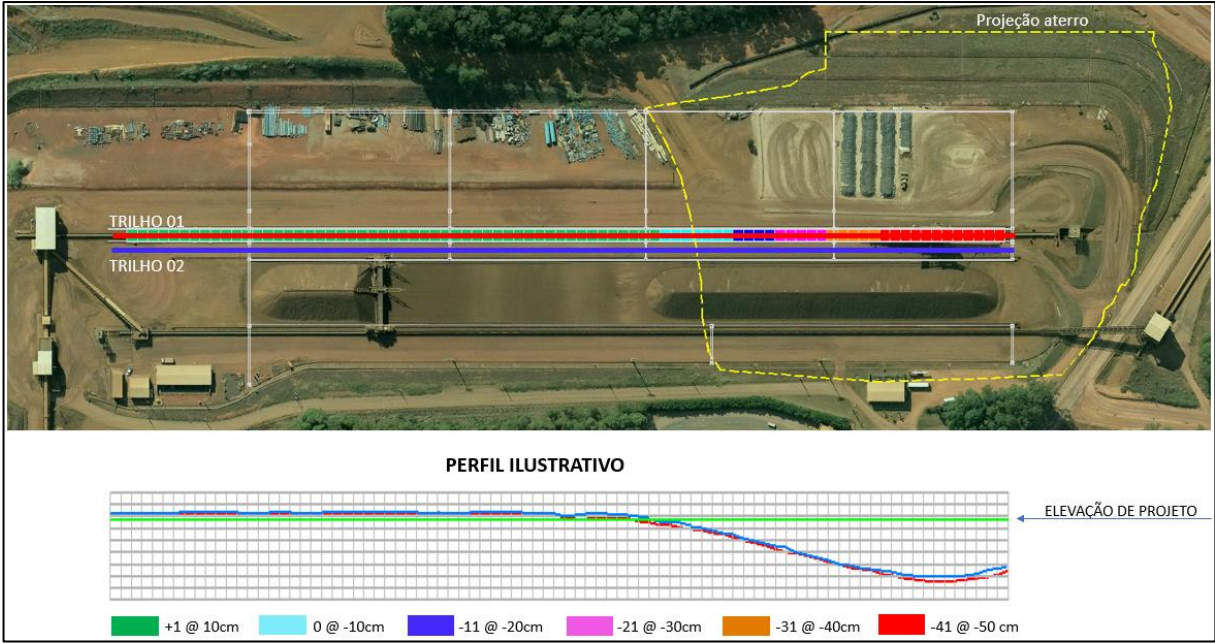


Figura 2-3: Recalque dos trilhos da Empilhadeira (Stacker). Fonte: Autor (2024).

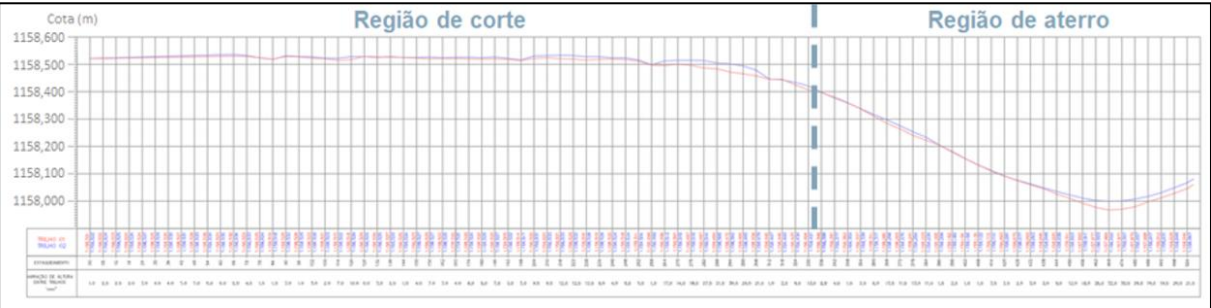


Figura 2-4: Recalque dos trilhos da Empilhadeira (Stacker) – comparativo entre corte e aterro. Fonte: Autor (2024).

Durante o acompanhamento topográfico do nivelamento dos trilhos também foi observado o recalque entre trilhos que foi de no máximo 30 mm o que evidencia que o conjunto de trilhos foi recalcado de forma praticamente igual (Tabela 2-1).

Tabela 2-1: Recalques máximos medidos nos trilhos da Empilhadeira.

Equipamento	Recalque ao longo do trilho (mm)	Recalque entre trilhos (mm)
Empilhadeira	560	30

Fonte: Autor (2024).

Em paralelo ao acompanhamento topográfico dos trilhos, falhas de componentes da Empilhadeira foram observados e correlacionados ao recalque. A Figura 2-6 e Figura 2-5 mostram respectivamente as datas de manutenção e evidências das falhas de componentes do sistema de locomoção da máquina, causados pelo desnível dos trilhos.

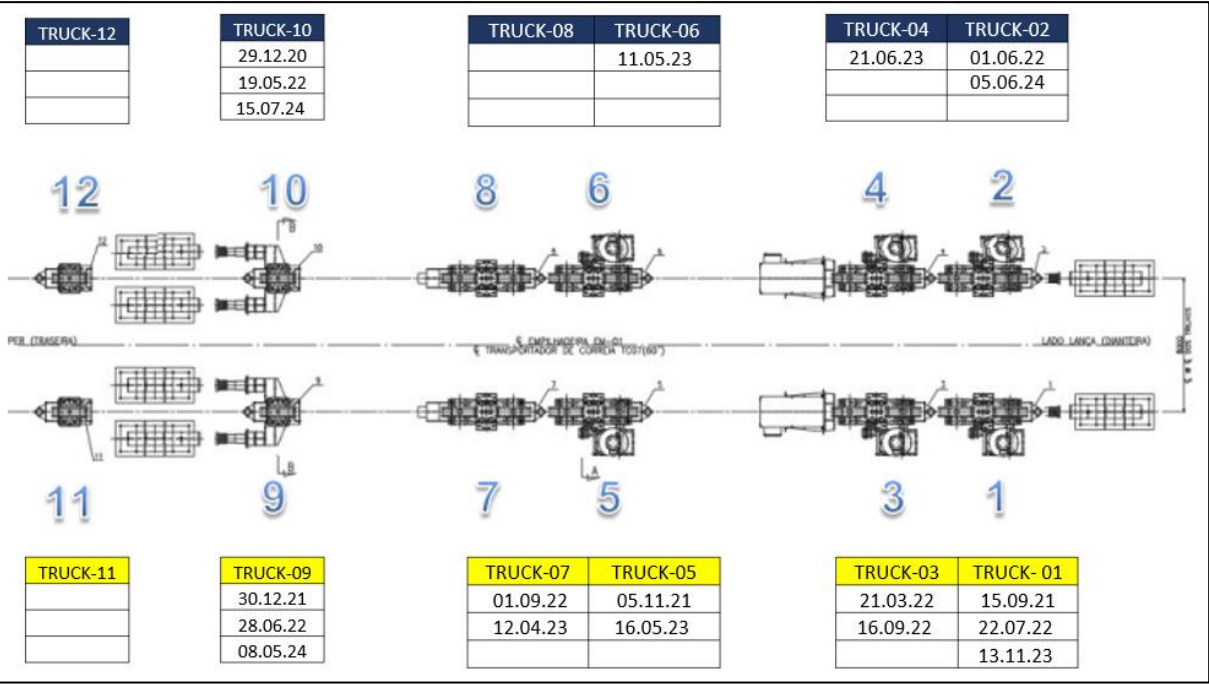


Figura 2-6: Controle de manutenção dos trucks da Empilhadeira (Stacker). Fonte: Autor (2024).



Figura 2-5: Fotos com evidências das falhas dos trucks da Empilhadeira (Stacker) mostrando rodas com bordas desgastadas e rolamentos quebrados prematuramente. Fonte: Autor (2024).

Com a identificação dos desvios nos caminhos de rolamento do Pátio de Homogeneização foi levantada a necessidade de atuação da engenharia para apoio na correção desses desvios.

Após primeira reunião interna, envolvendo os times de engenharia, manutenção e operação, uma empresa especializada em correções de pátios, indicada pela empresa fornecedora dos equipamentos foi contratada para desenvolver um plano de ação de curto prazo para o problema.

A empresa especializada ficou responsável pelo projeto de correção. Este processo de correção foi dividido em 3 etapas, sendo:

- Investigação dos eventos patológicos e suas causas;
- Avaliação do projeto de ampliação do pátio;
- Propostas de correção das patologias;

A seguir, na Figura 2-7 e Figura 2-9 estão evidências fotográficas do desnível, trincas e rachaduras provocadas pelo desnível dos trilhos e as correções propostas de quebra e reconstrução das bases civis, conforme mostradas na Figura 2-8.



Figura 2-7: Evidência das trincas e rachaduras da base civil dos trilhos da Empilhadeira (Stacker). Fonte: Autor (2024).



Figura 2-9: Evidência do desnível dos trilhos da Empilhadeira (Stacker). Fonte: Autor (2024).



Figura 2-8: Ilustração das correções de trincas e rachaduras da base civil dos trilhos da Empilhadeira (Stacker). Fonte: Autor (2024).

2.3. A justificativa

O desenvolvimento desse trabalho foi pensado diante do problema do recalque do solo na região do Pátio de Homogeneização de minério, como os desníveis dos trilhos e consequentes quebras de componentes de locomoção das máquinas de empilhamento e retomada, que nele operam, e até uma possível desestabilização destas com relação à especificação técnica do fabricante. Essa dissertação é importante para subsidiar as equipes de

engenharia e projetos, em instalações futuras, a partir do conhecimento mais profundo dos substratos da área.

O método de eletrorresistividade é fundamental na hidrogeologia, sendo utilizado para mapear aquíferos e monitorar a salinidade da água subterrânea (MCNEILL, 1990). Em estudos ambientais, a técnica é empregada para detectar plumas de contaminação e monitorar a remediação de solos contaminados (BENSON, PAYNE, STUBBEN, 1997). Na mineração, a eletrorresistividade auxilia na identificação de corpos mineralizados e estruturas associadas, aumentando a eficiência das operações de prospecção (KOEFOED, 1979).

A combinação da eletrorresistividade com outras técnicas geofísicas, como a sísmica, tem melhorado significativamente a resolução espacial das investigações, proporcionando uma visão mais completa das características geológicas (GRIFFITHS, TURNBULL, 1985). A sísmica, neste caso, foi utilizada por identificar interfaces geológicas mais profundas e por ter menos influência por fluidos, levando em conta que a região estudada é muito próxima ao anel de quartzito, fraturado, que poderia ter grande percolação de água.

Além disso, o desenvolvimento de equipamentos portáteis e robustos, juntamente com a integração com sistemas de GPS e modelagem tridimensional, tem ampliado as aplicações do método, permitindo levantamentos mais detalhados e precisos (REYNOLDS, 2011; LOKE, 2004).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Metodologia Científica

Para o referencial teórico foi realizada uma busca detalhada e sistemática sobre a aplicação do método de eletrorresistividade e do método da Análise Multicanal de Ondas de Superfície, do inglês *Multi-channel Analysis of Surface Waves* (MASW), no imageamento geológico. A metodologia adotada incluiu a busca, seleção e análise de fontes relevantes, como artigos científicos, dissertações, teses e livros. A busca foi conduzida em várias etapas, começando pela busca de literatura nas principais bases de dados acadêmicas, como *Google Scholar*, *Scientific Electronic Library Online (SciELO)*, BU - Bases de Dados em Engenharias, *Academic Search Premier* – ASP e o Portal da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Para garantir uma busca abrangente, utilizou-se palavras-chave específicas relacionadas ao tema, incluindo "eletrorresistividade", "MASW", "imageamento geológico", "métodos geofísicos", "hidrogeologia", "geotecnia", "mineração" e "arqueologia". A seleção das fontes foi baseada em critérios de relevância, data de publicação e contribuição para o campo de estudo.

Primeiramente, a relevância das fontes foi avaliada com base na pertinência ao tema de estudo. Somente foram incluídas fontes que abordam diretamente o uso do método de eletrorresistividade no contexto do imageamento geológico. Em seguida, a data de publicação foi um critério importante, com ênfase em publicações dos últimos 10 anos para assegurar a inclusão dos avanços mais recentes na tecnologia e metodologia.

No entanto, estudos clássicos que estabeleceram os princípios básicos e o desenvolvimento histórico do método também foram considerados. Por fim, a contribuição para o campo de estudo foi um critério importante. As fontes selecionadas ofereceram uma contribuição significativa para o conhecimento do método, incluindo novos métodos ou técnicas, aplicações inovadoras, resultados de estudos de caso relevantes, revisões abrangentes e discussões críticas sobre as limitações e desafios do método de eletrorresistividade.

A busca de literatura envolveu a utilização de estratégias de busca estruturadas para identificar e acessar artigos, teses, dissertações e livros relevantes. Cada fonte identificada foi registrada com informações bibliográficas completas. Após a identificação das fontes,

procedeu-se com a revisão e análise crítica de cada uma. Isso envolveu a leitura detalhada das fontes selecionadas, a extração e documentação das informações-chave, como metodologias utilizadas, resultados obtidos e discussões sobre as aplicações e limitações do método de eletrorresistividade. As informações extraídas foram organizadas em categorias temáticas para facilitar a síntese e análise subsequente.

3.2. Introdução ao Método de Eletrorresistividade

A eletrorresistividade baseia-se na medição da resistividade elétrica do solo e das rochas, proporcionando dados valiosos sobre a composição e a distribuição dos materiais geológicos (TELFORD, GELDART e SHERIFF, 1990). O método, que utiliza a injeção de uma corrente elétrica e a medição do potencial resultante, permite a construção de modelos de resistividade que ajudam na visualização de anomalias geológicas (REYNOLDS, 2011). A técnica tem sido amplamente empregada em diversos campos, como hidrogeologia, geotecnia, mineração e estudos ambientais, destacando-se pela sua capacidade de fornecer informações detalhadas sobre a subsuperfície sem a necessidade de intervenções invasivas (BURGER, SHEEHAN e JONES, 2006).

Os métodos geofísicos são técnicas indiretas de investigação da subsuperfície através da aquisição e interpretação dos parâmetros físicos obtidos por meio de instrumentos especiais, caracterizando-se como métodos não invasivos ou não destrutivos. A aplicação de métodos geofísicos em uma área permite avaliar as condições geológicas locais através dos contrastes das propriedades físicas dos materiais de subsuperfície como, por exemplo: condutividade ou resistividade elétrica, velocidade de propagação da onda P ou onda S, permissividade dielétrica, magnetismo, densidade, potencial espontâneo etc., que podem ter como origem às diferenciações litológicas e outras heterogeneidades do terreno, tanto naturais como induzidas.

Uma das principais vantagens da aplicação das técnicas geofísicas em relação aos métodos tradicionais de investigação em subsuperfície (por exemplo, sondagens diretas) é a varredura espacial de grandes áreas com menor custo relativo. Desta forma, a geofísica representa uma excelente opção para aperfeiçoar o tempo e complementar tais estudos, além de fornecer uma grande densidade de informações. Empregando-se uma ou mais técnicas

geofísicas, torna-se possível delimitar áreas potencialmente prioritárias para o(s) objetivo(s) dos projetos e, também, para embasar as decisões necessárias para as subseqüentes pesquisas.

Entre os métodos geofísicos, o Método Eletorresistivo é o mais utilizado em investigações de fluxos e percolações de fluidos em barragens e pilhas de rejeito, uma vez que o parâmetro medido, a resistividade elétrica dos materiais, é altamente sensível à presença de água entre os poros intersticiais.

Na literatura científica, existem diversos trabalhos que descrevem a aplicação de métodos geofísicos, especialmente o método de eletorresistividade (ER), em estudos de contaminação ambiental em áreas de disposição de resíduos (BORTOLIN e MALAGUTTI FILHO, 2010). A eletorresistividade é uma técnica geofísica amplamente utilizada que mede a resistividade elétrica do solo e das rochas para inferir suas propriedades geológicas. Este método se baseia no princípio de que diferentes materiais geológicos possuem diferentes resistividades elétricas (TELFORD, GELDART e SHERIFF, 1990). A Tabela 3-1 é um exemplo dos diferentes tipos de materiais e suas resistividades.

Tabela 3-1: Resistividades elétricas em Ohm.m para diferentes materiais conhecidos (Adaptado de Orellana, 1972).

LITOLOGIA	RESISTIVIDADE (Ohm.m)
Águas doces superficiais	10 a 1.000
Águas marinhas	0,2
Argilas	10 a 100
Areias	100 a 10.000
Areias Saturadas com água mineral	1 a 10
Aluvião	10 a 1.000
Conglomerados	10 a 10.000
Arenitos	10 a 108
Margas arenosas	10 a 100
Calcários	100 a 10.000
Basaltos	100 a 100.000
Granitos	100 a 100.000
Xistos	10 a 1.000
Gnaisses	100 a 10.000

Fonte: Autor (2024).

A aplicação do método de eletrorresistividade no imageamento geológico têm se mostrado importante na exploração e caracterização de subsuperfícies, permitindo a identificação de estruturas geológicas, aquíferos, zonas de contaminação e recursos minerais.

Assim, a aplicação de uma corrente elétrica no subsolo e a medição da diferença de potencial resultante permitem mapear a distribuição de resistividade no subsolo (REYNOLDS, 2011). Este método é essencial para diversas aplicações, incluindo a prospecção de água subterrânea, a investigação de contaminação ambiental e a exploração mineral (LOKE, 2004). A capacidade de detectar zonas de alta e baixa resistividade permite identificar aquíferos, zonas de contaminação e veios minerais (BURGER et al., 2006). Portanto, é uma ferramenta importante para geólogos e engenheiros.

A eletrorresistividade também envolve a inserção de eletrodos no solo para introduzir uma corrente elétrica e medir o potencial elétrico (KEAREY *et al.*, 2002). Dependendo da configuração dos eletrodos, como Dipolo-Dipolo, *Wenner* e *Schlumberger*, a profundidade e a resolução da investigação podem variar significativamente (WARD, 1990). Essas configurações são escolhidas com base nos objetivos específicos do estudo.

As medições de eletrorresistividade podem ser interpretadas para criar modelos de resistividade subsuperficial, que ajudam a visualizar estruturas geológicas enterradas (GRIFFITHS & BARKER, 1993). Estes modelos são essenciais para entender a distribuição de materiais geológicos e identificar anomalias (ZOHDY *et al.*, 1974). A interpretação correta dos dados de resistividade é essencial para aplicações práticas.

Por fim, a combinação da eletrorresistividade com outras técnicas geofísicas, como a tomografia elétrica, aumenta a precisão e a resolução das investigações (GRIFFITHS et al., 1990). A integração de múltiplos métodos proporciona uma visão mais completa do subsolo (REYNOLDS, 2011).

3.3. Fundamentos da Eletrorresistividade

A resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca aos materiais geológicos que indica a oposição ao fluxo de corrente elétrica. Esta propriedade é importante para a interpretação de dados geofísicos, pois diferentes tipos de rochas e solos apresentam resistividades distintas (TELFORD et al., 1990). A resistência ao fluxo de corrente elétrica é

medida em ohm-metros, e os valores podem variar amplamente, dependendo da composição mineralógica, saturação com água e presença de materiais condutivos ou resistivos.

A instrumentação básica para medição de eletrorresistividade inclui uma fonte de corrente, eletrodos para injeção de corrente e eletrodos para medição de potencial. Estes componentes são essenciais para criar um campo elétrico controlado no subsolo e medir a resposta da resistividade (GRIFFITHS & BARKER, 1993). A precisão e a qualidade dos dados dependem da limitação adequada dos instrumentos e da configuração dos eletrodos no solo. Quanto menor o espaçamento dos eletrodos melhor a resolução para identificar os estratos.

As configurações dos eletrodos são uma parte fundamental da metodologia de termorresistência. Entre as mais comuns estão as configurações Dipolo-Dipolo, *Wenner*, e *Schlumberger*, cada uma com suas próprias vantagens e limitações (REYNOLDS, 2011).

Na configuração Dipolo-Dipolo, os eletrodos de corrente (A e B) e os eletrodos de potencial (M e N) estão agrupados em pares separados, tem sensibilidade a variações laterais e é mais utilizado para investigações bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D). Esse arranjo tem boa resolução horizontal e sensível a heterogeneidade do solo, porém com menor profundidade de investigação comparado aos outros arranjos.

A configuração *Wenner* envolve a disposição linear de quatro eletrodos espaçados igualmente. A corrente é injetada pelos eletrodos externos e o potencial é medido pelos eletrodos internos (TELFORD et al., 1990). Esta configuração é especialmente útil para estudos superficiais e fornece uma boa relação sinal-ruído, tornando-se ideal para investigações geofísicas rasas, como a determinação da resistividade elétrica do solo e a detecção de variações subsuperficiais de extratos horizontalizados.

A configuração de *Schlumberger*, por outro lado, utiliza eletrodos de corrente fixa com eletrodos de potenciais móveis (GRIFFITHS & BARKER, 1993). Esta abordagem permite profundidade de resistividade a diferentes profundidades sem mover os eletrodos de corrente, o que é vantajoso para sondagens profundas e desenvolvidas. No entanto, exige um controle mais rigoroso e uma interpretação mais complexa.

A resistividade medida é convertida em resistividade aparente, que é um valor médio da resistividade verdadeira das camadas geológicas sob investigação. Este processo de conversão é fundamental para a modelagem geofísica e para a construção de perdas de resistividade que representam a estrutura subterrânea (GRIFFITHS & BARKER, 1993). As anomalias detectadas

nas análises de resistividade indicam variações geológicas específicas, como veios preenchidos por minerais.

A interpretação dos dados de eletrorresistividade envolve técnicas avançadas de modelagem matemática e computacional. Modelos bidimensionais e tridimensionais são frequentemente usados para simular o comportamento da resistividade em diferentes cenários geológicos (LOKE, 2004). Esses modelos ajudam a visualizar a distribuição de resistividade e a identificar características geológicas críticas para a exploração e o estudo ambiental.

Os avanços tecnológicos melhoraram significativamente as capacidades das técnicas de eletrorresistividade. O desenvolvimento de sistemas de aquisição multicanal e *softwares* de modelagem avançados permite uma coleta de dados mais eficiente e uma interpretação mais precisa (REYNOLDS, 2011). Essas inovações continuam a expandir as possibilidades de aplicação desta técnica em diferentes contextos.

Por fim, a eletrorresistividade continua a evoluir como uma ferramenta essencial em geofísica aplicada. A integração com outras técnicas geofísicas, como a sísmica, aumenta a resolução e a confiabilidade dos estudos geológicos, assim esta abordagem integrada é fundamental para resolver problemas complexos e fornecer informações detalhadas (GRIFFITHS & TURNBULL, 1985).

3.4. Aplicações do Método de Eletrorresistividade

Na hidrogeologia, a eletrorresistividade é muito utilizada para identificar aquíferos e monitorar a salinidade da água subterrânea. A capacidade de diferenciar entre zonas de alta e baixa resistividade permite a localização precisa de recursos hídricos subterrâneos, porém, estudos detalhados de eletrorresistividade são fundamentais para a gestão eficiente de recursos hídricos, especialmente em áreas áridas e semiáridas onde a água subterrânea é um recurso essencial (MCNEILL, 1990).

Na geotecnia, a eletrorresistividade auxilia na caracterização do solo para a construção civil. A avaliação das propriedades do solo, como a porosidade e a presença de materiais condutivos, é essencial para determinar a estabilidade das fundações e a viabilidade de projetos de engenharia, onde a eletrorresistividade permite a identificação de camadas de solo com

diferentes propriedades geotécnicas, contribuindo para a segurança e a durabilidade das construções (GRIFFITHS & BARKER, 1993).

A avaliação das propriedades geotécnicas do solo ajuda a prevenir problemas estruturais (PALACKY, 1988). A segurança e a estabilidade das construções dependem dessa análise prévia.

Na mineração, a eletrorresistividade é empregada para detectar corpos mineralizados e estruturas geológicas associadas. A técnica permite a identificação de anomalias de resistividade que indicam a presença de minerais valiosos, como metais sulfetados (KOEFOED, 1979). A utilização da eletrorresistividade na prospecção mineral pode reduzir significativamente os custos e o tempo de exploração, aumentando a eficiência das operações de mineração (TELFORD *et al.*, 1990).

Na exploração mineral, a eletrorresistividade ajuda a localizar veios de minério e estruturas geológicas associadas (KOEFOED, 1979). A detecção de minerais economicamente importantes depende da habilidade de identificar anomalias resistivas (WARD, 1990).

Além disso, na arqueologia, a eletrorresistividade ajuda a localizar estruturas enterradas, como muros, túmulos e artefatos. A técnica permite a detecção de diferenças de resistividade causadas por objetos enterrados ou alterações no solo devido a atividades humanas passadas (CLARK, 1996). A eletrorresistividade é uma ferramenta não invasiva que preserva o contexto arqueológico enquanto proporciona informações valiosas sobre sítios históricos (ASPINAL *et al.*, 2008).

Em estudos ambientais, a eletrorresistividade é empregada para detectar plumas de contaminação e monitorar a remediação de solos contaminados (Benson *et al.*, 1997). A detecção de contaminantes é facilitada pela diferença de resistividade entre solos contaminados e não contaminados, onde isso permite intervenções rápidas e eficazes em casos de poluição (NIELSEN, 1991).

A eletrorresistividade também é aplicada em estudos de aterros sanitários para monitorar a integridade das barreiras de contenção e a distribuição de lixiviados. A técnica permite identificar falhas nas barreiras e áreas onde os lixiviados podem estar se espalhando, ajudando a prevenir a contaminação do solo e da água subterrânea. O monitoramento contínuo com eletrorresistividade é uma prática comum em gestão de resíduos sólidos (PALACKY, 1988).

Na prospecção geotérmica, a eletrorresistividade é utilizada para identificar zonas de alta condutividade térmica associadas a recursos geotérmicos. A capacidade de mapear variações de temperatura e fluidez de fluidos no subsolo é essencial para a exploração de energia geotérmica. Assim como, a eletrorresistividade fornece informações importantes para a localização de reservatórios geotérmicos e para a avaliação do potencial energético de uma área (REYNOLDS, 2011).

A técnica de eletrorresistividade também tem aplicações em estudos costeiros para mapear a interface entre água doce e água salgada em aquíferos costeiros. A diferenciação entre zonas de salinidade variável é fundamental para a gestão de recursos hídricos em regiões costeiras, onde a intrusão salina pode comprometer a qualidade da água doce. Assim, a eletrorresistividade permite monitorar essas interfaces de forma contínua e precisa (FROHLICH et al., 1994).

Na engenharia de petróleo, a eletrorresistividade é utilizada para mapear a distribuição de hidrocarbonetos em reservatórios subterrâneos. A técnica auxilia na caracterização das propriedades do reservatório e na determinação da saturação de fluidos, como óleo, gás e água (WARD, 1990). Essa informação é importante para melhorar a extração de petróleo e maximizar a recuperação dos recursos (LOKE, 2004).

Por fim, a eletrorresistividade é usada em estudos de risco geológico para identificar áreas suscetíveis a deslizamentos de terra e outras instabilidades. A detecção de zonas de baixa resistividade associadas a materiais frágeis ou saturados com água é essencial para a prevenção de desastres naturais. A técnica permite o monitoramento contínuo dessas áreas, proporcionando dados para a tomada de decisões informadas e mitigação de riscos (GRIFFITHS & TURNBULL, 1985).

3.5. Metodologia de Aquisição de Dados

O planejamento no método de eletrorresistividade começa com a definição da área de estudo. Esta etapa é crucial para garantir que os objetivos da investigação sejam alcançados de forma eficiente (GRIFFITHS & BARKER, 1993). A área deve ser selecionada com base em informações geológicas preliminares e nas questões específicas que a pesquisa pretende responder. A definição precisa da área permite otimizar os recursos e obter dados relevantes.

A escolha da configuração de eletrodos é outra etapa importante no planejamento. As configurações mais comuns, como Dipolo-Dipolo, *Wenner* e *Schlumberger*, oferecem diferentes vantagens em termos de profundidade de investigação e resolução (TELFORD et al., 1990). A seleção adequada da configuração é essencial para obter dados de qualidade e responder às questões geológicas específicas (NOGUEIRA, 2014).

A densidade de pontos de medição também deve ser cuidadosamente planejada. Uma alta densidade de pontos proporciona maior resolução e detalhamento do subsolo, mas aumenta o tempo e os custos da pesquisa (REYNOLDS, 2011). A densidade deve ser balanceada de acordo com os objetivos da investigação e os recursos disponíveis, onde o planejamento eficaz garante que as áreas críticas sejam bem cobertas e que as informações obtidas sejam suficientes para uma interpretação precisa.

A coleta de dados envolve a inserção de eletrodos no solo e a aplicação de corrente elétrica. Os eletrodos de corrente introduzem uma corrente elétrica no subsolo, enquanto os eletrodos de potencial medem a diferença de potencial gerada (GRIFFITHS & BARKER, 1993). A precisão na colocação dos eletrodos e na medição das distâncias entre eles é fundamental para garantir a acurácia dos dados coletados, assim, equipamentos de alta precisão são utilizados para minimizar erros de medição.

Durante a coleta de dados, é essencial monitorar e registrar as condições ambientais que podem influenciar as medições, como a umidade do solo e a presença de estruturas artificiais próximas (NIELSEN, 1991). Essas informações são necessárias para corrigir possíveis distorções nos dados, onde a documentação cuidadosa de todos os passos da coleta de dados assegura a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Já o processamento de dados envolve a conversão das medições de campo em modelos de resistividade, utilizando software especializado. Este processo inclui a aplicação de algoritmos matemáticos para inversão dos dados brutos e gerar imagens do subsolo (LOKE, 2004). Softwares modernos permitem a criação de modelos bidimensionais e tridimensionais, que oferecem uma visão detalhada das estruturas subterrâneas, e a qualidade do processamento de dados é determinante para a precisão das interpretações.

Neste contexto, a modelagem de dados de eletrorresistividade frequentemente envolve a aplicação de técnicas inversas, onde as resistividades medidas são ajustadas iterativamente para corresponder aos dados observados (GRIFFITHS & TURNBULL, 1985). Este processo de inversão é importante para transformar medições brutas em um modelo geológico

interpretável onde a validação dos modelos gerados é realizada comparando os resultados com informações geológicas conhecidas e outros dados geofísicos.

Os resultados processados são analisados para identificar anomalias de resistividade que possam indicar a presença de características geológicas específicas, como aquíferos, zonas de contaminação ou veios minerais (TELFORD et al., 1990). A interpretação dos dados requer conhecimento especializado em geologia e geofísica para distinguir entre diferentes tipos de anomalias e inferir corretamente as condições do subsolo. Assim como, ferramentas de visualização avançadas são frequentemente utilizadas para facilitar a interpretação dos modelos.

A integração dos dados de eletrorresistividade com outras informações geofísicas e geológicas melhora significativamente a precisão das interpretações. Dados sísmicos, magnéticos e de gravidade podem ser combinados com medições de resistividade para fornecer uma imagem mais completa e detalhada do subsolo. Assim, esta abordagem integrada é fundamental para resolver ambiguidades e obter uma compreensão holística das características geológicas (MCNEILL, 1990).

Por fim, a documentação e a apresentação dos resultados são etapas importantes do processo. Relatórios detalhados, contendo os métodos utilizados, os dados coletados, os modelos gerados e as interpretações, são preparados para comunicar os achados da pesquisa. Onde a clareza e a precisão na apresentação dos resultados garantem que as informações possam ser utilizadas eficazmente por outros pesquisadores e profissionais da área (REYNOLDS, 2011).

3.6. Limitações do Método

As limitações do método de eletrorresistividade incluem a influência de ruídos naturais e artificiais, a resolução limitada em profundidades maiores e as dificuldades em terrenos altamente resistivos ou condutivos. Os ruídos naturais, como variações no campo elétrico terrestre e a presença de materiais condutores naturais, podem distorcer os dados coletados. Os ruídos artificiais, como linhas de transmissão de energia e equipamentos elétricos próximos, também podem interferir nas medições, exigindo técnicas de filtragem para minimizar esses efeitos (GRIFFITHS & TURNBULL, 1985).

A resolução limitada em profundidades maiores é outro desafio significativo. À medida que a profundidade de investigação aumenta, a corrente elétrica se dispersa mais, reduzindo a precisão das medições de resistividade. Isso torna difícil a identificação de pequenas variações geológicas em profundidades maiores, e as soluções para esse problema incluem o uso de configurações de eletrodos mais adequadas e o aumento da densidade de pontos de medição para melhorar a resolução (TELFORD et al., 1990).

Terrenos altamente resistivos ou condutivos apresentam problemas específicos, onde em terrenos altamente resistivos, a corrente elétrica se propaga com dificuldade, resultando em sinais fracos e dados menos precisos. Em terrenos altamente condutivos, a corrente pode se espalhar rapidamente, dificultando a detecção de variações de resistividade. Técnicas avançadas de medição e a utilização de equipamentos de alta sensibilidade são necessárias para lidar com esses desafios (LOKE, 2004).

A mitigação desses desafios envolve a melhoria dos equipamentos e a combinação com outras técnicas geofísicas. Equipamentos modernos com maior sensibilidade e capacidade de filtragem de ruídos ajudam a obter dados mais precisos mesmo em condições adversas. A utilização de softwares avançados para processamento e modelagem de dados também contribui para a melhoria das limitações, permitindo uma interpretação precisa dos resultados (REYNOLDS, 2011).

A combinação do método de eletrorresistividade com outras técnicas geofísicas, como a sísmica de refração e a magnetometria, pode aumentar a confiabilidade das investigações. Cada técnica oferece diferentes informações sobre o subsolo, e a integração dessas informações permite uma compreensão mais completa das características geológicas. A abordagem integrada ajuda a superar as limitações individuais de cada método, proporcionando uma visão mais detalhada e precisa do subsolo (MCNEILL, 1990).

A inversão de dados permite ajustar os modelos de resistividade para melhor corresponder às medições observadas, melhorando a precisão da interpretação geológica. A utilização de técnicas de inversão em 2D e 3D possibilita a criação de modelos mais detalhados e realistas das estruturas subterrâneas (GRIFFITHS & TURNBULL, 1985).

A escolha adequada da configuração de eletrodos também é importante para mitigar limitações. Configurações como dipolo-dipolo, *Wenner* e *Schlumberger* têm diferentes capacidades de resolução e profundidade de investigação, e a seleção da configuração correta para as condições específicas do terreno pode melhorar significativamente a qualidade dos

dados, assim como a adaptação das configurações às características geológicas locais é essencial para obter resultados mais precisos (TELFORD *et al.*, 1990).

A implementação de práticas rigorosas de controle de qualidade durante a coleta de dados é outra medida importante, com o intuito de monitorar e registrar as condições de medição, realizar calibrações frequentes dos equipamentos e adotar procedimentos padronizados que ajudam a reduzir erros e aumentar a confiabilidade dos dados coletados. Assim, o treinamento adequado dos operadores de campo também é fundamental para garantir a qualidade das medições (NIELSEN, 1991).

Finalmente, a pesquisa contínua e o desenvolvimento de novas tecnologias são essenciais para superar as limitações do método de eletrorresistência. Inovações em sensores, técnicas de medição e algoritmos de processamento de dados têm o potencial de melhorar a sensibilidade e a precisão das medições. Assim, com a colaboração entre pesquisadores e a aplicação de novos conhecimentos na prática geofísica continuarão a expandir as capacidades e a eficácia do método de eletrorresistividade (REYNOLDS, 2011).

3.7. Avanços Tecnológicos e Inovações

Inovações recentes no método de eletrorresistividade incluem o desenvolvimento de equipamentos portáteis e robustos, que facilitam a realização de levantamentos geofísicos em áreas remotas e de difícil acesso. Esses equipamentos modernos são projetados para suportar condições ambientais adversas, garantindo a continuidade das medições em diversos tipos de terreno. Essa portabilidade dos equipamentos permite uma maior flexibilidade nas operações de campo, otimizando o tempo e os recursos utilizados nas investigações geofísicas (REYNOLDS, 2011).

A integração com Sistemas de Posicionamento Global (GPS) é outra inovação significativa, permitindo o mapeamento preciso das posições dos eletrodos durante a coleta de dados. Esta integração facilita a correlação dos dados geofísicos com informações geográficas exatas, melhorando a precisão espacial das medições. Assim, o uso de GPS garante que as posições dos pontos de medição possam ser reproduzidas com alta precisão, o que é essencial para estudos repetitivos e monitoramento a longo prazo (LOKE, 2004).

Já a modelagem 3D (Modelagem tridimensional) tem se tornado uma ferramenta importante para interpretações mais detalhadas dos dados de eletrorresistividade. Com o uso de *software* especializado, é possível criar modelos tridimensionais que representam com maior precisão a complexidade das estruturas geológicas do subsolo. Assim, a modelagem 3D permite a visualização de variações de resistividade em todas as direções, facilitando a identificação de anomalias geológicas e a compreensão das relações espaciais entre diferentes unidades geológicas (GRIFFITHS & BARKER, 1993). Os softwares mais comuns em modelagem 3D são o Blender, um programa gratuito e versátil, o Autodesk Maya e o 3ds Max, que são padrões da indústria, e o ZBrush, focado em modelagem orgânica e escultura. Para engenharia e projetos, destacam-se o SolidWorks e o Fusion 360, enquanto o SketchUp é ideal para iniciantes e para design arquitetônico.

A combinação do método de eletrorresistividade com a tomografia elétrica tem melhorado significativamente a resolução espacial das investigações geofísicas. A tomografia elétrica envolve a medição sistemática de resistividade ao longo de múltiplas linhas e a aplicação de técnicas de inversão para gerar imagens detalhadas do subsolo. Esta abordagem integrada proporciona uma maior profundidade de investigação e uma resolução mais alta, permitindo a detecção de estruturas geológicas complexas que podem não ser visíveis com métodos tradicionais (REYNOLDS, 2011).

Outra inovação importante é o uso de algoritmos avançados de processamento e inversão de dados. Algoritmos modernos permitem a análise rápida e eficiente de grandes volumes de dados de resistividade, gerando modelos precisos em tempo real. Esses algoritmos são capazes de lidar com a heterogeneidade e a anisotropia do subsolo, melhorando a acurácia das interpretações e reduzindo a incerteza nos resultados (LOKE, 2004).

Os avanços na tecnologia de sensores também têm contribuído para a melhoria das medições de eletrorresistividade. Sensores mais sensíveis e com maior faixa dinâmica permitem a detecção de variações sutis de resistividade, aumentando a resolução das imagens geofísicas. Sensores modernos são menos suscetíveis a ruídos e interferências, garantindo medições mais confiáveis em ambientes desafiadores (GRIFFITHS & TURNBULL, 1985).

A aplicação de técnicas de *machine learning* e inteligência artificial na interpretação de dados de eletrorresistividade está emergindo como uma área promissora. Esses métodos podem automatizar o processo de análise de dados, identificar padrões complexos e prever características geológicas com base em grandes conjuntos de dados. A inteligência artificial

pode aumentar a eficiência das investigações geofísicas e fornecer informações mais amplas sobre a estrutura do subsolo (REYNOLDS, 2011).

Já a utilização de sistemas de aquisição de dados multicanal tem revolucionado a coleta de dados de eletrorresistividade. Esses sistemas permitem a medição simultânea de múltiplos pontos de resistividade, acelerando significativamente o processo de levantamento. Assim, a capacidade de adquirir dados em várias direções e profundidades ao mesmo tempo melhora a cobertura espacial e a resolução dos estudos geofísicos (LOKE, 2004).

Os avanços na comunicação e no armazenamento de dados também têm facilitado a gestão de grandes volumes de informações geofísicas. Sistemas de armazenamento em nuvem e plataformas de compartilhamento de dados permitem que os resultados das investigações sejam acessados e analisados em tempo real por equipes dispersas geograficamente. Essa conectividade melhora a colaboração entre pesquisadores e facilita a integração de dados de múltiplas fontes (REYNOLDS, 2011).

Por fim, a contínua pesquisa e desenvolvimento em novas tecnologias e métodos garante que o campo da eletrorresistividade continue a evoluir. Investimentos em inovação tecnológica e a adoção de práticas de pesquisa avançadas são essenciais para expandir as aplicações e melhorar a eficácia do método. Dessa forma, a colaboração entre universidades, instituições de pesquisa e a indústria geofísica impulsiona o desenvolvimento de soluções inovadoras para desafios geológicos complexos (GRIFFITHS & TURNBULL, 1985).

3.8. O método sísmico MASW

O método sísmico MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) é uma das mais empregadas para caracterização geotécnica da subsuperfície por permitir a obtenção de importantes parâmetros, como o módulo de rigidez inicial de solos e rochas.

Os ensaios sísmicos com ondas de superfície são muito utilizados na caracterização geotécnica da subsuperfície por permitirem a obtenção do módulo de rigidez inicial dos solos e rochas (G_0 ou $G_{\text{máx}}$), considerado o parâmetro mais importante na caracterização dinâmica destes materiais. Entre as técnicas de uso de ondas superficiais, o MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) é o mais empregado para fins geotécnicos. As aplicações de ensaios de ondas superficiais em geotecnia tiveram início na década de 1980, com o SASW (*Spectral*

Analysis of Surface Waves) pela equipe da Universidade de Austin, Texas (NAZARIAN & STOKOE, 1983).

Há dois tipos de ondas sísmicas de corpo: ondas P, mais rápidas e longitudinais, e ondas S, cisalhantes. Estas ondas se propagam pelo interior da Terra. As ondas de superfície surgem como resultado da interferência de ondas P e S e, como o nome sugere, se propagam apenas pela superfície – a sua amplitude se atenua exponencialmente com a profundidade. Os seus principais tipos são as ondas *Rayleigh* e *Love*. Utilizando-se uma fonte para criar ondas longitudinais (ondas P), mais de dois terços da energia sísmica produzida corresponde a ondas *Rayleigh* (RICHART et al. Apud MARCHIORETO, 2002), cujo sinal sísmico costuma ser referido como “trem de ondas”.

As ondas superficiais em um meio verticalmente heterogêneo apresentam comportamento dispersivo, isto é, diferentes frequências têm diferentes velocidades de propagação, designadas por velocidade de fase. Nos meios geológicos, as camadas mais inferiores geralmente têm uma maior impedância acústica do que as camadas superiores. Isso implica que as camadas mais profundas geralmente têm uma maior velocidade de propagação de ondas do que as camadas mais rasas. Quanto às ondas de superfície, as frequências mais altas também têm menores comprimentos de onda, tendo sua velocidade influenciada apenas pelas camadas mais rasas. Já as frequências mais baixas têm maiores comprimentos de onda e a sua velocidade é influenciada também pelas camadas mais profundas. Assim, geralmente as frequências mais baixas têm maiores velocidades de propagação (MARCHIORETO, 2002).

A relação entre a velocidade de fase e a frequência é representada pela curva de dispersão e depende essencialmente do perfil geológico da subsuperfície. Esta curva pode ser obtida experimentalmente e a sua interpretação permite estimar as propriedades do subsolo. As altas frequências caracterizam a zona mais superficial do solo enquanto as baixas frequências caracterizam a zona mais profunda.

Simplificadamente, o ensaio MASW é realizado usando dois receptores verticais (geofones P), que registram os impulsos provocados no solo por uma fonte impulsiva. Através de técnicas de Transformada de *Fourier*, o sinal das ondas *Rayleigh* é usado para a obtenção das curvas de dispersão, que mostram a variação da velocidade das ondas em função da frequência (ou do comprimento de onda). Na última etapa do processamento, algoritmos de inversão de dados são aplicados às curvas de dispersão para a obtenção de perfis de velocidade

de onda S (V_s) em função da profundidade. Conhecendo-se o valor da densidade específica dos materiais (ρ), obtém-se o valor de G_0 pela relação: $G_0 = \rho V_s^2$ (MARCHIORETO, 2002).

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (1);$$

onde:

G_0 = módulo de rigidez inicial dos solos e rochas (Pa);

ρ = densidade específica do material (g/cm³);

V_s = velocidade de propagação da onda transversal (m/s);

Nas últimas décadas, metodologias foram desenvolvidas para o estudo das ondas superficiais com aquisição com múltiplos receptores, normalmente 24 ou mais. Além de permitir uma maior agilidade nos trabalhos de campo, esta aquisição tem maior rigor nos resultados devido à elevada integridade espectral dos dados adquiridos. As técnicas de aquisição, processamento e inversão têm sido desenvolvidas por vários autores, como: Park et al., 1996; Park et al., 1999, Foti, 2000, Strobbia, 2003; destacando-se os trabalhos desenvolvidos pelo grupo da Universidade de Kansas nos Estados Unidos, criadores do *software SurfSeis*, e pelo grupo de ondas superficiais da Escola Politécnica de Torino, onde foi criado o programa *PoliSurf* para o tratamento dos dados.

A aquisição dos dados é realizada usando-se múltiplos receptores de baixa frequência (24 ou mais) e uma fonte impulsiva registrando, no tempo e no espaço, o “trem de ondas” completo em que as ondas *Rayleigh* são dominantes. O sismograma obtido deve conter o registro das ondas *Rayleigh* em uma larga banda de frequências, pois a profundidade atingida pelo ensaio depende da frequência mínima registrada.

O processamento consiste, essencialmente, em obter-se a curva de dispersão a partir do sismograma (t,x), trabalhando no domínio frequência-número de onda (f-k). O sismograma tempo-distância é transformado para o domínio f-k através da aplicação da Transformada de Fourier 2D (FFT 2D), que consiste na aplicação sucessiva de duas Transformadas de Fourier. Na primeira operação os dados do domínio tempo-distância são transformados em frequência-

distância, decompondo os sinais registrados de acordo com o seu conteúdo em frequências. Na segunda aplicação da transformada, na direção espacial, os dados são transpostos para o domínio frequência-número de onda ($f-k$). O espectro $f-k$ (Figura 3-1 a) mostra as propriedades dispersivas das ondas Rayleigh, com a curva de dispersão correspondendo aos pontos de máxima energia para cada frequência.

Geralmente, a maior parte da energia do espectro $f-k$ se concentra em torno do modo fundamental da curva de dispersão, permitindo a marcação dos pontos que definem esta curva (pontos brancos na Figura 3-1 b). Eventualmente, outros modos da curva de dispersão também podem conter alta energia (1º harmônico, 2º harmônico etc.), por isso, esta interpretação é realizada com atenção e em conjunto com as demais curvas de dispersão obtidas ao longo do alinhamento.

Posteriormente, a curva de dispersão passa por um processo matemático de inversão, no qual se obtém um modelo de camadas com diferentes espessuras e velocidades da onda S (perfil 1D) que se ajustam à curva (Figura 3-1 b). O processo de inversão da curva de dispersão consiste na obtenção dos parâmetros do modelo do terreno através de algoritmos que minimizam o erro entre os dados experimentais (dados de campo) e os dados calculados. A inversão pode ser realizada utilizando-se diferentes abordagens (TARANTOLA, 1987), entre elas um processo iterativo de inversão das curvas modais, com base no método dos mínimos quadrados ponderados de *Marquardt-Levenberg*.

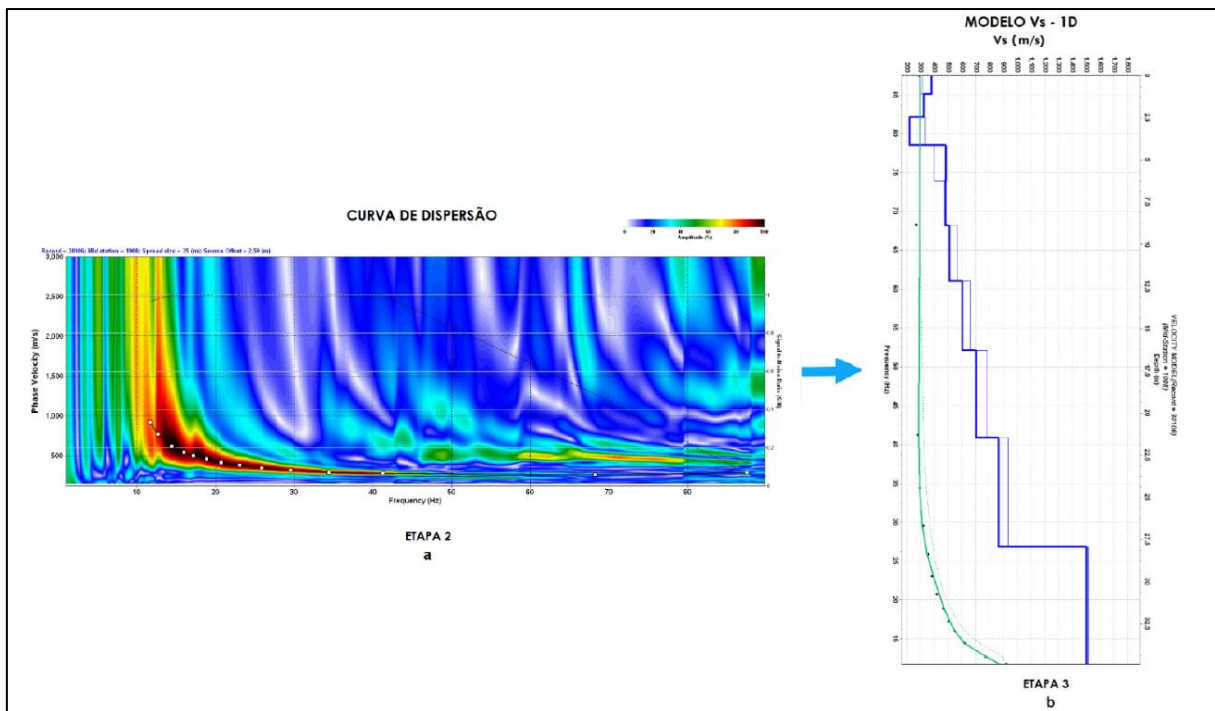


Figura 3-1: Exemplo de curva de dispersão típica (a) e o modelo 1D interpretado (b) que melhor ajustou a esta curva (espessuras e velocidades da onda S). Fonte: Autor (2023).

Para cada base MASW são extraídos perfis 1D similares, procedimento que possibilita a construção das seções MASW 2D com modelos 1D ao longo das linhas. Para cada base MASW implantada em campo são obtidos perfis 1D de velocidade de onda S, correspondendo às diferentes posições ao longo desta base. Desta forma, avançando o arranjo em sucessivas bases MASW, ao longo de uma linha de estudos (*roll-along*), é possível construir um perfil 2D interpolando-se todos os perfis 1D gerados em suas respectivas posições (distâncias progressivas ao longo da linha).

Em casos com linhas sísmicas mais curtas, é possível realizar o caminhamento dos pontos de batida (tiros) ao longo de uma base fixa, conhecido como caminhamento ao longo da linha (*walkaway*). Isto possibilita a extração de pontos 1D de forma otimizada para cada base sísmica unitária e permite a construção de modelos (menor distância entre pontos 1D amostrados) e a compilação de seções 2D mais confiáveis, visto que a inversão dos dados apresentará maior densidade de informações.

Tipicamente, para uma base sísmica com 24 canais, é possível extrair 09 perfis 1D que ficam distribuídos ao longo do alinhamento sísmico, gerando uma seção 2D com a melhor resolução lateral da informação MASW, de forma a ser possível discretizar eventuais anomalias (vazios, contatos laterais etc.). Como exemplo, a Figura 3-2 apresenta um perfil MASW 2D obtido por sete bases sísmicas consecutivas, procedimento que facilita a visualização das distintas velocidades V_s em profundidades (no exemplo, mais de 30 m), possibilitando o mapeamento de anomalias nos valores de V_s (ocorrências delimitadas com predomínio de altos ou baixos valores) dependendo dos objetivos do projeto. Para a visualização das variações das velocidades, normalmente utiliza-se uma escala cromática associada aos valores de V_s (m/s) onde as cores frias representam as baixas velocidades e, cores quentes, as mais altas velocidades.

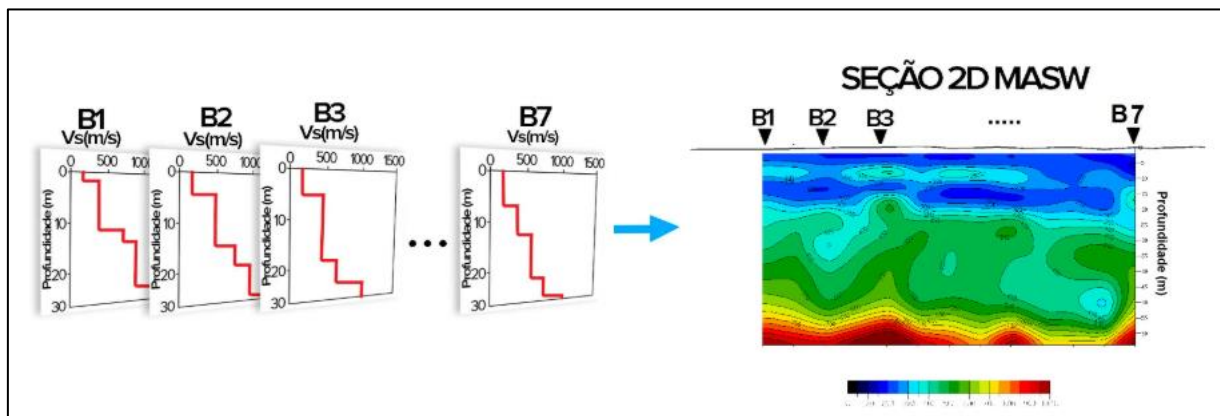


Figura 3-2: Composição das várias bases MASW 1D (B1 a B7, neste caso), para gerar o perfil 2D executado ao longo de um alinhamento (roll-along). Fonte: Autor (2023).

As velocidades de propagação das ondas mecânicas em um meio qualquer são relacionadas aos módulos de elasticidade dinâmica, mais especificamente ao módulo de cisalhamento (G) e módulo de elasticidade (E). Resumidamente, pode-se dizer que o módulo de cisalhamento é definido como a razão entre a tensão cisalhante aplicada ao corpo e a sua deformação específica, enquanto o módulo de Elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido.

Ambos são parâmetros fundamentais para a engenharia e aplicação de materiais, pois estão associados com a descrição de várias outras propriedades mecânicas, por exemplo, a tensão de escoamento, a tensão de ruptura, a variação de temperatura crítica para a propagação

de trincas sob a ação de choque térmico etc. Outro parâmetro associado às velocidades sísmicas V_p e V_s é conhecido como coeficiente de *Poisson* (ν), ele mede a deformação transversal em relação à direção longitudinal de aplicação da carga de um material homogêneo e isotrópico, sendo este um valor adimensional. A relação estabelecida entre os parâmetros elásticos e as velocidades V_p e V_s são dadas pelas seguintes equações (MARCHIORETO, 2002):

$$V_p = \sqrt{\{E[1 - \nu]/(\rho(1 - 2\nu)(1 + \nu))\}} \quad (1);$$

$$V_p = \sqrt{\{E/[2\rho(1 + \nu)]\}} \quad (2a);$$

ou,

$$V_s = \sqrt{[G/(\rho)]} \quad (2b);$$

ou ainda,

$$G = \rho V_s^2 \quad (2c);$$

portanto,

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad (3);$$

$$E = V_p^2 \rho \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{(1 - \nu)} \quad (4).$$

onde:

V_p = velocidade de propagação da onda longitudinal (m/s);

V_s = velocidade de propagação da onda transversal (m/s);

ρ = massa específica do material (g/cm³);

ν = coeficiente de *Poisson* (adimensional);

G = módulo de cisalhamento ou módulo de rigidez (Pa);

E = módulo de elasticidade ou módulo de *Young* (Pa).

Estes parâmetros variam de acordo com o material e relacionam a quantidade de deformação sofrida por um material em função da força exercida sobre ele.

3.9. A geologia local

A região de Araxá, sob o ponto de vista tectônico, está estruturada em uma dobra sinformal regional, denominada Sinforma de Araxá. Os flancos principais, contidos nessa estrutura regional, estão nos setores nordeste e sudoeste e sua linha de charneira apresenta direção aproximada N70W, com caimento suave para NW. A Zona de Cisalhamento da Bocaina, que está localizada em seu flanco sul, consiste em um sistema de falhas transcorrentes sinistrais (SEER, 1999).

Aproximadamente a 6 km ao sul da cidade de Araxá, está situado o Complexo Alcalino-carbonatítico de Araxá (CACA) (Figura 3-3). Nessa figura, o retângulo vermelho representa a área de estudo. Sua forma em planta é circular, com 4,5 km de diâmetro e está alojado em sequências metassedimentares Neoproterozoicas do Grupo Ibiá (SEER et al., 2000) e é datado de $89,4 \pm 10,1$ Ma (SONOKI e GARDA, 1988), quando houve deformação das encaixantes em uma estrutura dômica e desenvolvimento de fraturas radiais (TRAVERSA et al., 2001).

Segundo TORRES (1996), o CACA é formado por flogopititos cortados por *necks*, *plugs* e veios carbonatíticos, veios e diques de apatitito, nelsonito, magnetitito, e de barita. Esse complexo está coberto por um espesso manto de intemperismo com espessura que pode chegar a 230 m (RODRIGUES e LIMA, 1984).

O núcleo de rochas ígneas é circundado por quartzitos e xistos do Grupo Ibiá, que se arqueiam em forma de domo. É composto por bebedouritos, carbonatitos, foscoritos e sienitos, além de abundantes quantidades de flogopititos metassomáticos.

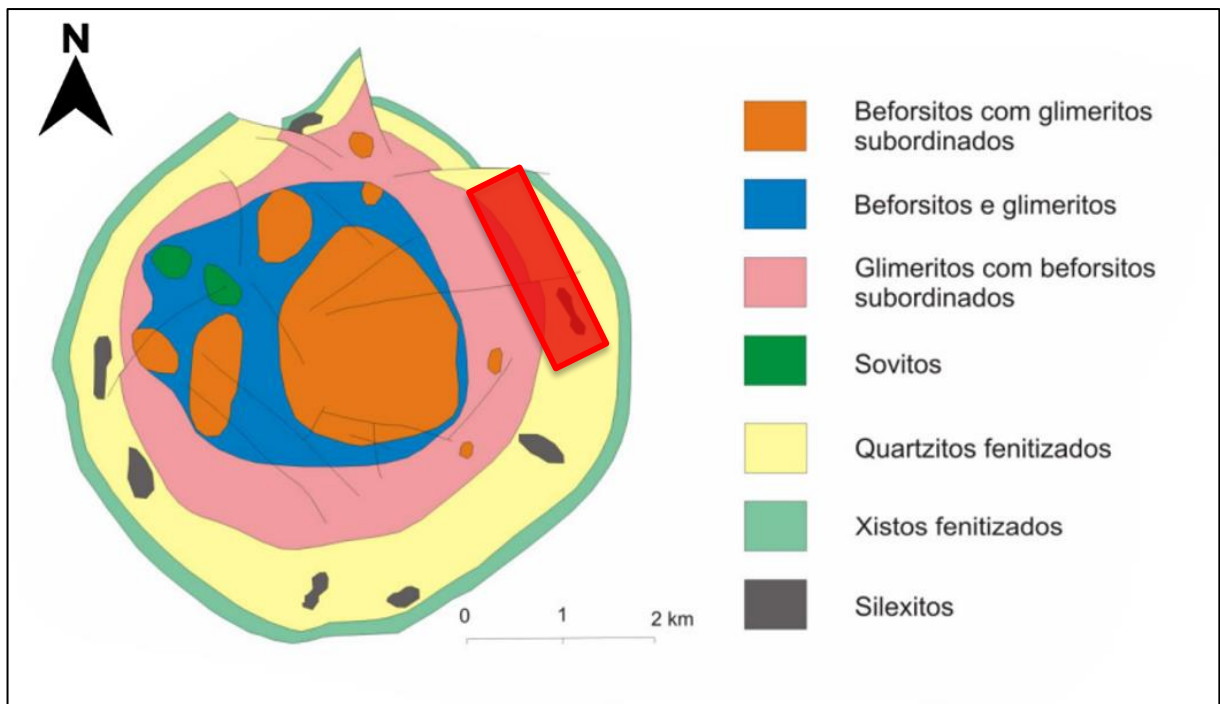


Figura 3-3: Configuração Geológica do Complexo Alcalino do Barreiro. Fonte: Modificado de Biondi (2003).

O CACA pode ser dividido em horizontes intempéricos de acordo com o modelamento geológico a seguir (GOMES, 2017) (Figura 3-4):

- 1- **Solo:** nesse horizonte o material se apresenta capeando grande parte do CACA, com exceção de onde já ocorreu a remoção desse material por conta da exploração. Sua característica se apresenta argilosa a pouco siltosa, com espessura que varia de poucos metros a dezenas de metros;
- 2- **Alteritos:** esse horizonte pode ser dividido em dois: alterito laranja e alterito marrom, sendo que ambos são produtos das alterações dos carbonatitos. Composto pela mineralização em nióbio, barita e fosfatos de terras raras, o alterito laranja apresenta-se friável em grande parte muito fino (silto-arenoso). Já o alterito marrom, composto por um pacote friável e oxidado, tem variação de granulométrica de argila a areia média. Com predominância pela mineralização de fosfato (apatita).
- 3- **Saprolito:** possuindo alguns metros de espessura e acima da rocha sã, esta unidade contém materiais menos intemperizados em comparação ao alterito, rica em minerais micáceos como a flogopita;

- 4- **Rocha carbonatítica sã:** formada a partir de carbonatitos dolomíticos, brechados, constituída de calcita, dolomita, apatita, flogopita, pirita e magnetita. Além disso essa rocha apresenta intercalações silicificadas, com presença de calcita, dolomita, apatita, flogopita, magnetita, pirita;
- 5- **Quartzito fenitizado:** marcada pela presença de arfvedsonita, feldspato alcalino, calcita, barita, piroxênio sódico e apatita e silexitos nas encaixantes, a auréola de fenitização tem como característica o intenso fraturamento. Na superfície, a alteração se mostra mais proeminente, como um horizonte arenoso, que aflora nas bordas da intrusão. A porção não alterada dessa litologia, apresenta-se em profundidades maiores, com presença de fraturas e falhas;
- 6- **Xisto:** esse horizonte apresenta alteração nas camadas superiores e diminuindo com o aumento da profundidade e assim como o quartzito fenitizado. Em algumas regiões de xistos silicificados, observa-se a presença de poros de dissolução. Essas rochas fraturadas ocorrem em um horizonte na ordem de 15 a 30 metros de espessura, atingindo profundidades de até 50 metros.

A Figura 3-4 apresenta o modelo litológico tridimensional do CACA com exemplos de furos de sondagem.

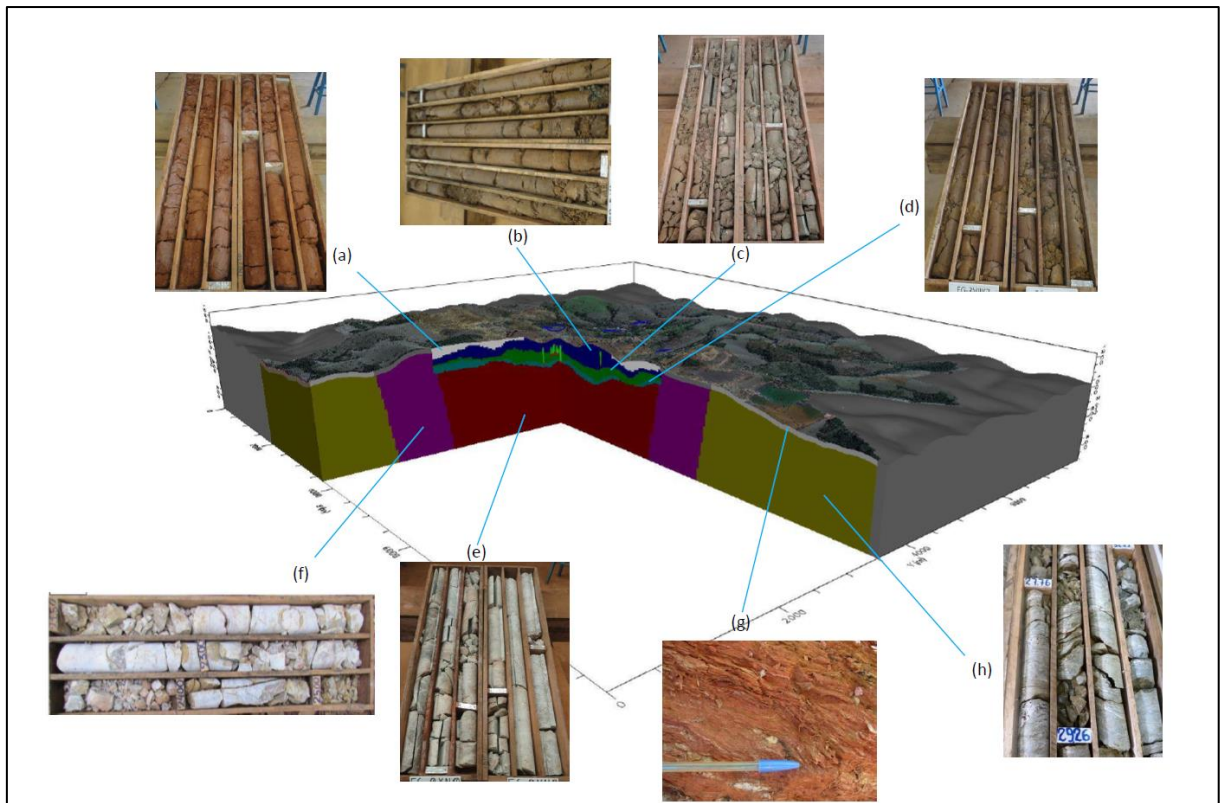


Figura 3-4: Modelo geológico tridimensional mostrando exemplos de furos de sonda de cada litotipo. (a) Solos; (b) e (c) Alteritos laranja e marrom; (d) Saprolitos; (e) Rocha carbonatítica sã; (f) Quartzitos fenitizados; (g) Xistos alterados/fraturados; (h) Xistos não alterados. Fonte: GOMES (2017).

Resistência dos materiais no local do estudo

A classificação de resistência de um material é importante para determinar as características do solo ou das rochas. Esse processo, visa conhecer seus comportamentos de acordo com as solicitações que lhe são impostas (OLIVEIRA, 1998).

Diante da predominância de solos da área do estudo, uma das maneiras de determinação da classificação da resistência é o reconhecimento das características dos litotipos presentes na mina com o auxílio de um mapa geológico e uma martelo de geólogo, seguindo o sistema de classificação da ISRM (LIMA, 2024).

Os parâmetros de resistência dos materiais de uma mina, segundo a ISRM - *International Society for Rock Mechanics* (1981), são definidos com R01, quando o material deve esmagalhar-se com apenas um golpe de martelo, com aparência extremamente friável e se desfaz com o golpe do martelo. Para a classificação R02, a superfície do talude deve ser marcada com o golpe firme com a ponta do martelo e, essa característica é percebida observando um desprendimento de pequenos blocos, geralmente em pontos de fratura. Já para

a classificação R03, a diferença deve ser sentida quando com o golpe firme do martelo, observa-se um desprendimento de pequenos blocos, geralmente em pontos de fratura.

Na **Figura 3-5**, são apresentados exemplos de locais levantados para determinação da resistência da litologia na mina de Araxá.

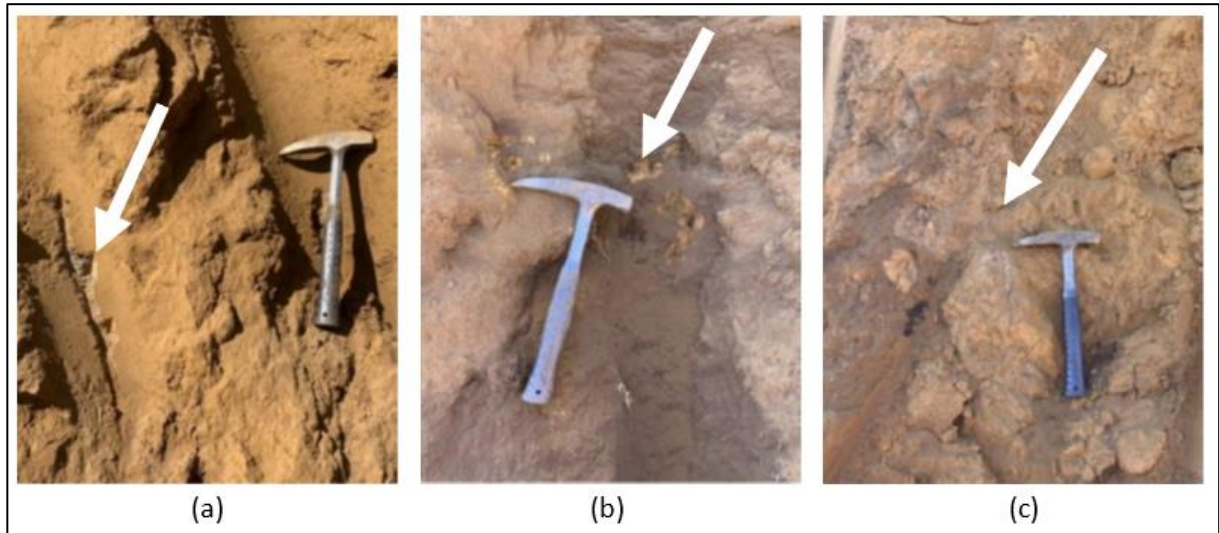


Figura 3-5: (a) Classificação R01; (b) Classificação R02; (c) Classificação R03. Fonte: Adaptado de LIMA, 2024.

De acordo com as resistências encontradas na mina, através do método de golpes de martelo, LIMA (2024) gerou um mapa com as litologias presentes (Figura 3-6).

LIMA (2024) destaca que o método aplicado, com golpes de martelo apresenta uma condição de subjetividade relacionada ao fator humano e a sensibilidade do executor.

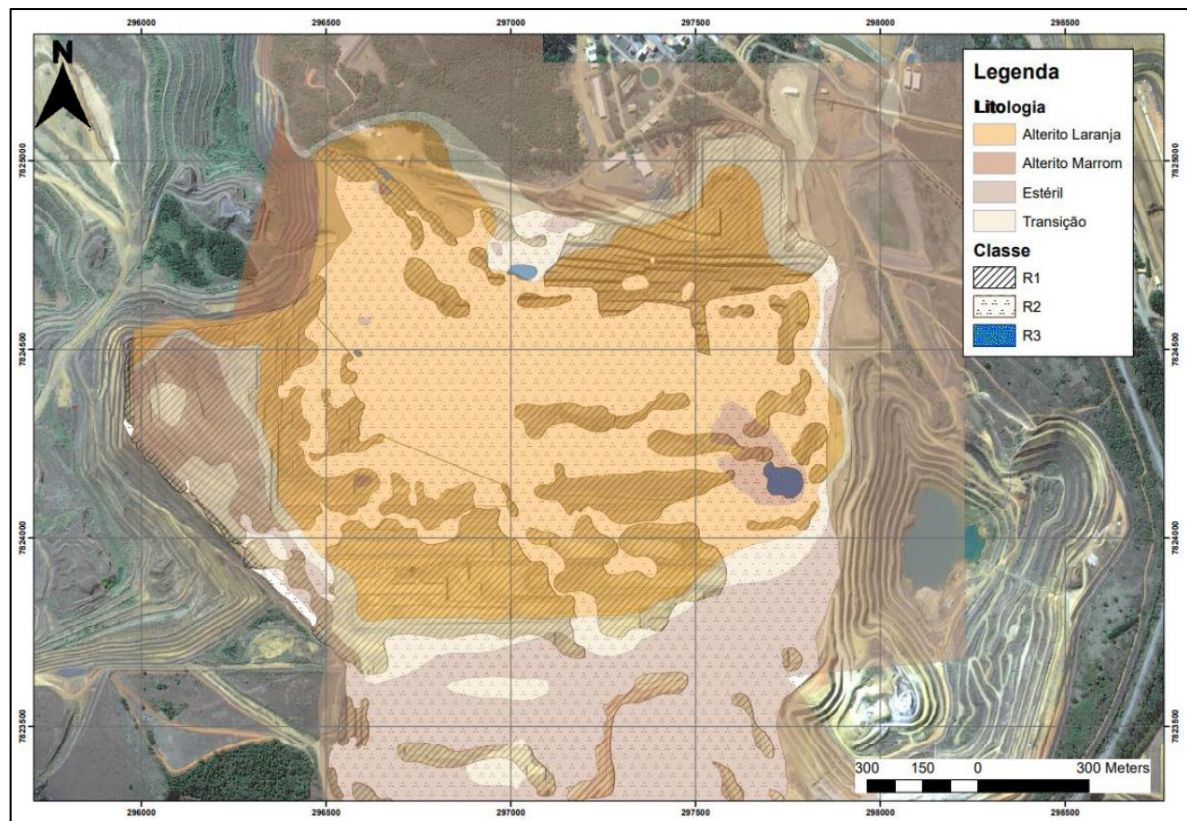


Figura 3-6: Mapa de horizonte intempérico x resistência Fonte: LIMA (2024).

Grande parte dos pontos mapeados apresentaram resistência R01 ou R02 e apenas alguns pontos foram relacionados como R03. Na Figura 3-7 pode-se constatar a distribuição dos valores de resistência encontrados no mapeamento, e analisando essas informações de acordo com a tabela de Classificação de Resistência (ISRM, 1981), é possível perceber que dos 875 pontos mapeados, 56% dos pontos estão relacionados com um valor de resistência entre 1,00 e 5,00 MPa e 42% dos pontos de 5,00 a 25,00 MPa de resistência. Apenas 1% dos pontos apresentam uma resistência maior, de 25,00 a 50,00 MPa (LIMA, 2024).

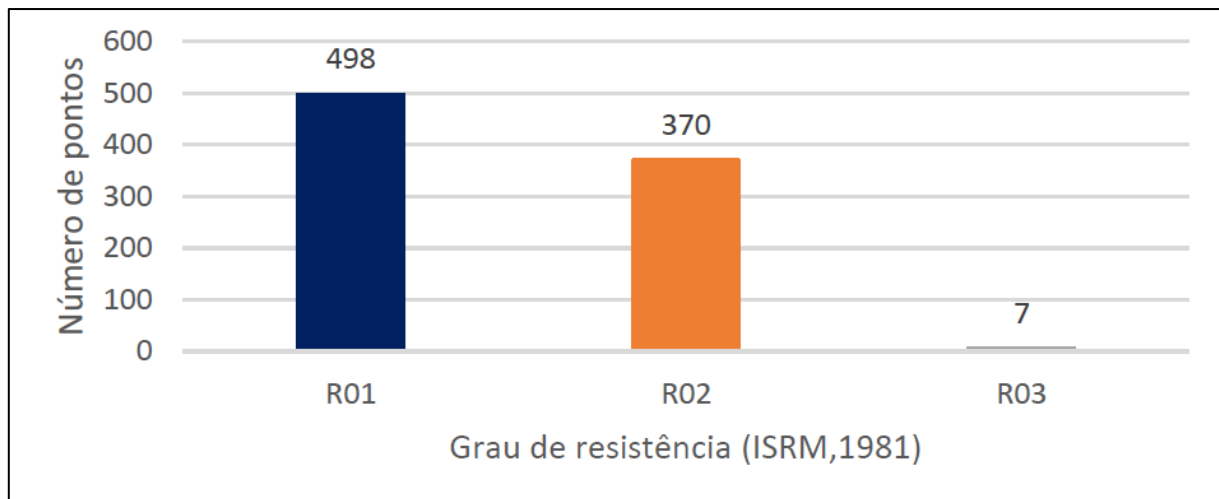


Figura 3-7: Classificação de resistência dos pontos mapeados. Fonte: LIMA (2024).

3.9.2. Fraturas e falhas no local do estudo

Segundo FEITOSA et al., 2008, o termo fratura engloba os conceitos de: (i) juntas, que são descontinuidades em que o movimento entre os blocos é muito pequeno na escala considerada; (ii) falhas (ou zonas de falhas), cujas dimensões podem variar de metros a dezenas de quilômetros e que possuem deslocamento entre paredes contíguas. Os contatos entre litologias distintas, mecanicamente contrastantes também devem ser considerados como provedores de espaços abertos nas rochas. Devido à dimensão variável das fraturas, o seu reconhecimento pode envolver a análise de imagens de satélite, fotos aéreas de detalhe e/ou o estudo de afloramentos.

Atualmente existe um consenso de que as estruturas frágeis (ou rúpteis) têm extrema importância na criação de espaços nas rochas cristalinas, sendo pontos de possíveis movimentações e acomodações de massas.

O conhecimento geológico do CACA é ainda limitado, especialmente do ponto de vista tectônico, devido a dois fatores principais: (i) o espesso manto de intemperismo (que ultrapassa os 100m de profundidade em vários locais, mascarando e até mesmo obliterando estruturas (MORAES & SEER, 2008), e (ii) a escassez de trabalhos de mapeamento geológico fora das jazidas de nióbio e fosfato (SILVA et al, 1979).

SILVA et al. (1979) e GROSSI SAD & TORRES (1971) já haviam caracterizado o controle das estruturas no entorno do CACA, com enfoque tectônico, apresentando uma

proposição do mapa geológico do complexo, exibindo o traçado de algumas falhas radiais na borda do anel de quartzitos fenitizados.

Dois pontos no anel de quartzitos fenitizados do CACA (Figura 3-8), foram alvos de levantamentos realizados com o objetivo de obter as direções preferenciais das estruturas rúpteis. Um dos pontos é um afloramento na região NE do complexo que teve como objetivo, melhorar o entendimento de um possível condicionamento do fluxo de águas subterrâneas, promovido por estas estruturas. Mais especificamente, verificar se havia uma conexão entre águas subterrâneas do interior do CACA, com a parte externa do mesmo, ao longo destas falhas. (Relatório Técnico Interno, 2020). Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o diagrama indica que as falhas coincidem com o sentido do fluxo das águas subterrâneas assumindo a direção NE, infletindo acima da falha para compor as nascentes de um córrego da região.

O outro ponto foi em uma trincheira, para atividades internas, da empresa detentora da área do estudo (Relatório Técnico Interno, 2022). No diagrama de rosetas gerado para esse ponto, conforme Figura 3-10, é possível observar que há uma distribuição que sugere uma tendência de direções variando em torno do Norte. A maior pétala, que corresponde a 9,95% do total de leituras tem direção NNE-SSW. O vetor médio apresenta direção $357,4^\circ$, com um erro de $6,3^\circ$ e 95% de confiança. Dessa forma, pode-se considerar que a direção preferencial das fraturas tem direção geral N-S. Apesar de incipiente, a foliação das rochas encaixantes foi medida em alguns pontos e apresenta direção ENE, com mergulho de aproximadamente 45° para NNW. No entanto, estas atitudes variam no entorno do CACA (comunicação pessoal de Hildor José Seer, 1999).

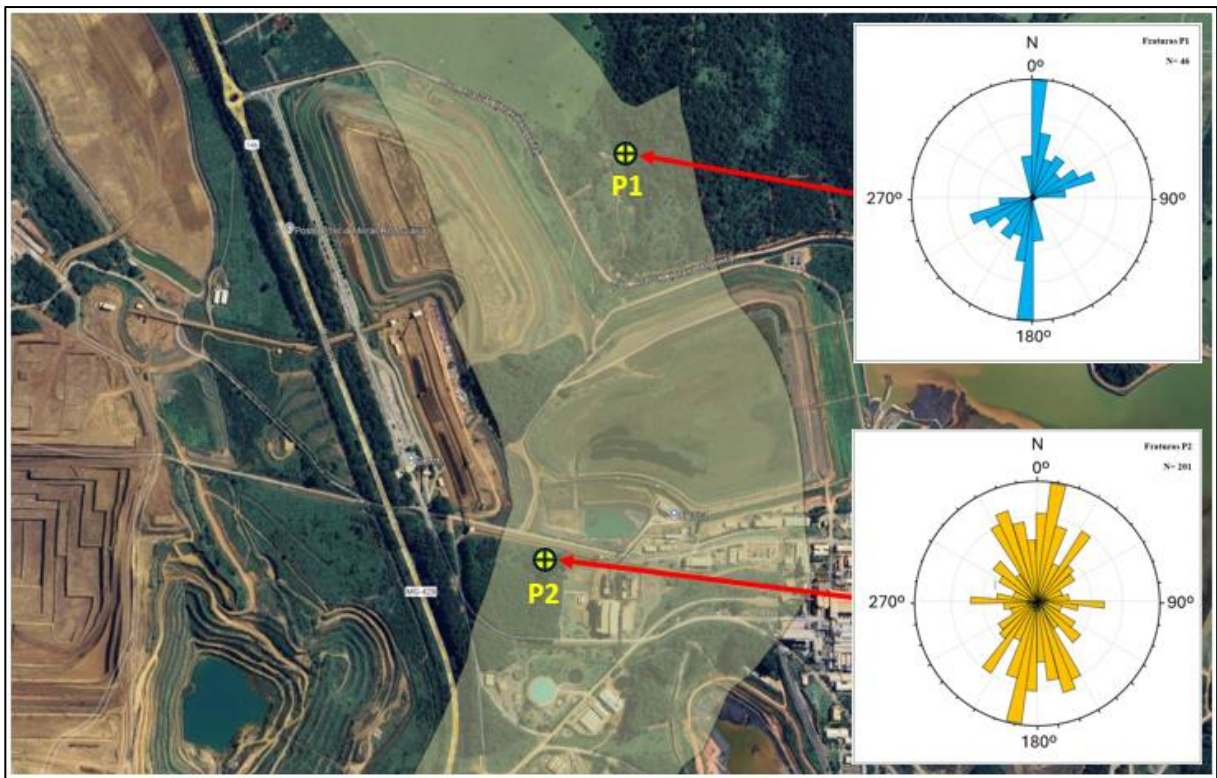


Figura 3-8 Pontos no anel de quartzitos fenitizados do CACA (P1 e P2), alvos de levantamentos realizados com o objetivo de obter as direções preferenciais das estruturas rúpteis. Fonte: Autor (2025).

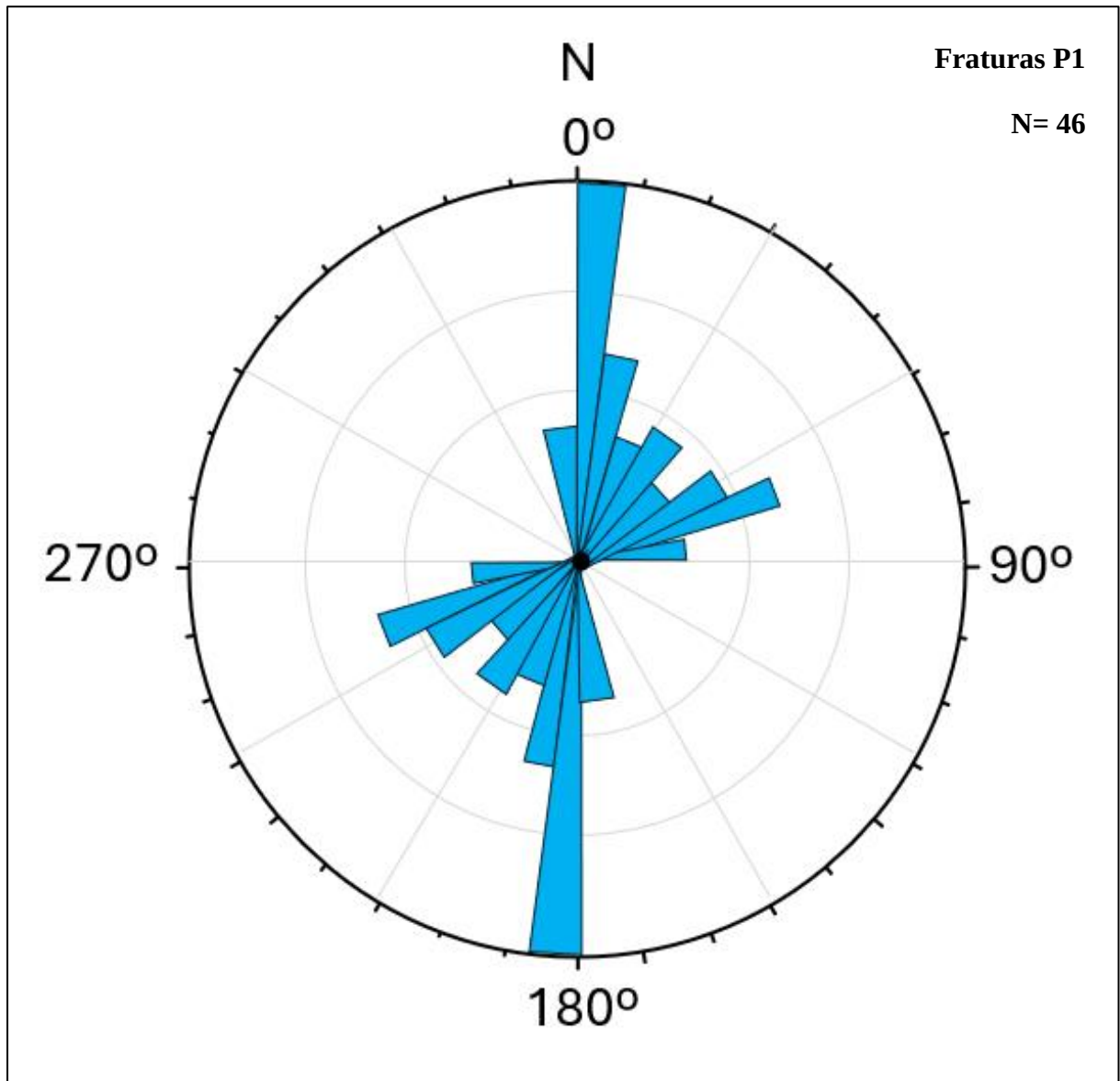


Figura 3-9: Diagrama de rosetas P1. Para localização ver Figura 5-28. Fonte: GOMES (2017).

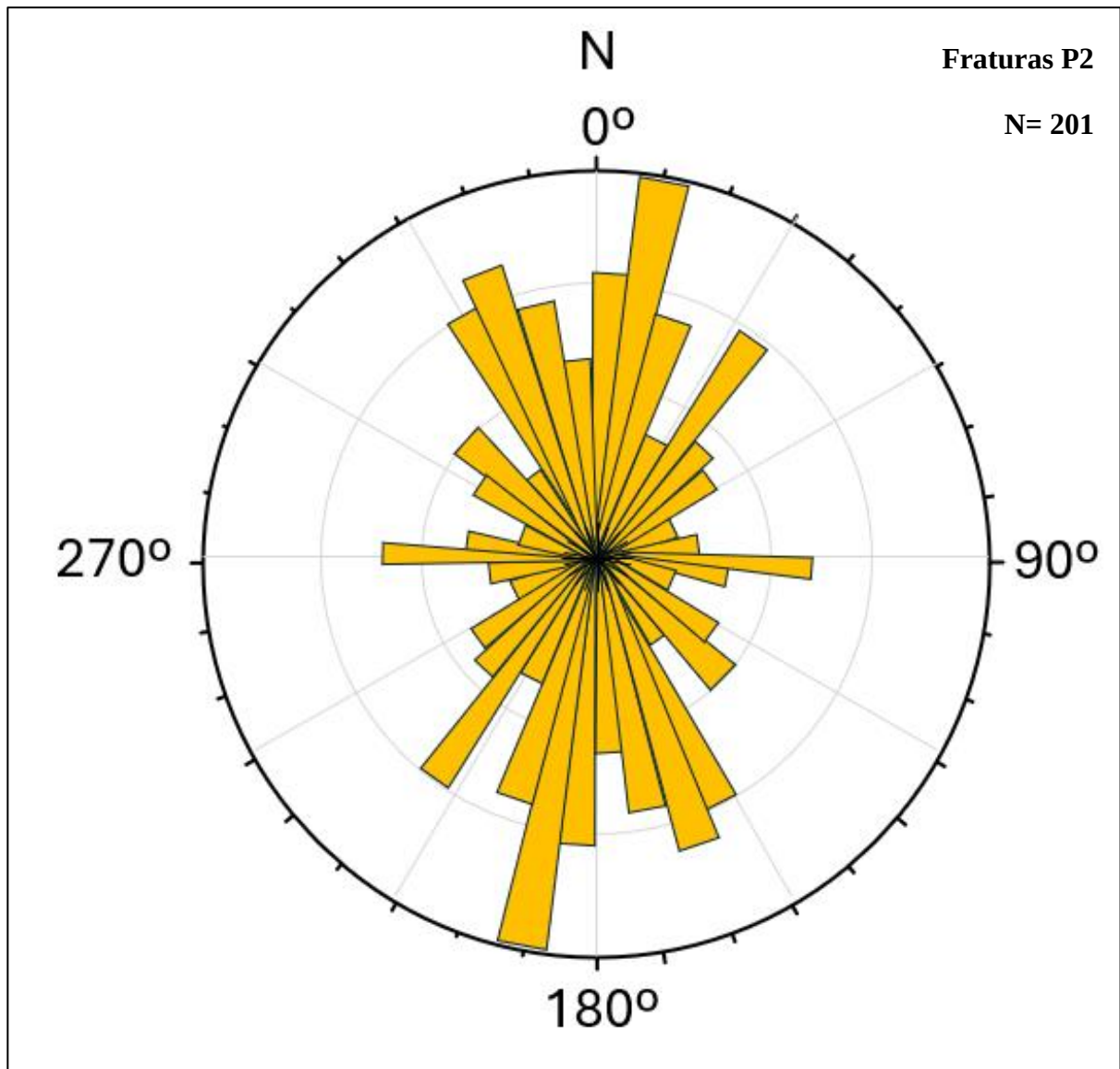


Figura 3-10: Diagrama de rosetas P2. Para localização ver Figura 5-28. Fonte: Gomes (2020).

4. METODOLOGIA

Um levantamento geofísico pelo método eletrorresistivo foi realizado, na área do Pátio de Homogeneização de Minério, objetivando o mapeamento da percolação de fluidos e de caminhos preferenciais de fluxos. Foi feito, ainda, o levantamento pelo Método Sísmico MASW para avaliação das capacidades de suporte geomecânico dos materiais em subsuperfície.

Em seguida foi feita a descrição e considerações dos levantamentos executados, interpretação dos resultados, as Seções de Imageamento Geoelétrico 2D (SIG's), a imagem do modelamento 3D das resistividades elétricas (biblioteca digital), os Perfis de Vs 2D obtidos, uma Planta com a Síntese das informações, bem como uma documentação fotográfica.

4.1. Trabalhos de Campo

Nos trabalhos em campo foram levantados os alinhamentos geoelétricos (L1, L2, L7, L8, L9 e T1) juntamente com os alinhamentos sísmicos (T1 a T5). A Figura 4-1 mostra a Planta de Localização dos alinhamentos geoelétricos investigados na área do Pátio de Homogeneização. Os alinhamentos geoelétricos longitudinais L1, L2, L7 e L11 (em vermelho), L9 (em amarelo) foram implantados paralelos entre si no sentido NW-SE, a linha transversal T1 (em vermelho) foi implantada no sentido SW-NE, a linha L8 (em vermelho) na diagonal (no final do Pátio), no sentido NW-SE. O alinhamento L11 seria a continuidade da linha L9, se não fosse a existência de uma via com muito tráfego. A Figura 4-1 também mostra os 05 alinhamentos sísmicos investigados, T1 a T5, implantados transversalmente às linhas geoelétricas L1, L2, L7 e L9. A Linha T3 foi dividida em duas partes (T3A em azul e T3 em ciano) devido a intersecção de um transportador de correia existente no local.

No caso de divisão das linhas SIG L9/L11 e MASW T3A/T3 devido aos transportadores de correia e também da MASW T2, devido à proximidade de um prédio de britagem, pode gerar algumas incertezas devido aos ruídos citados no item 3.6.

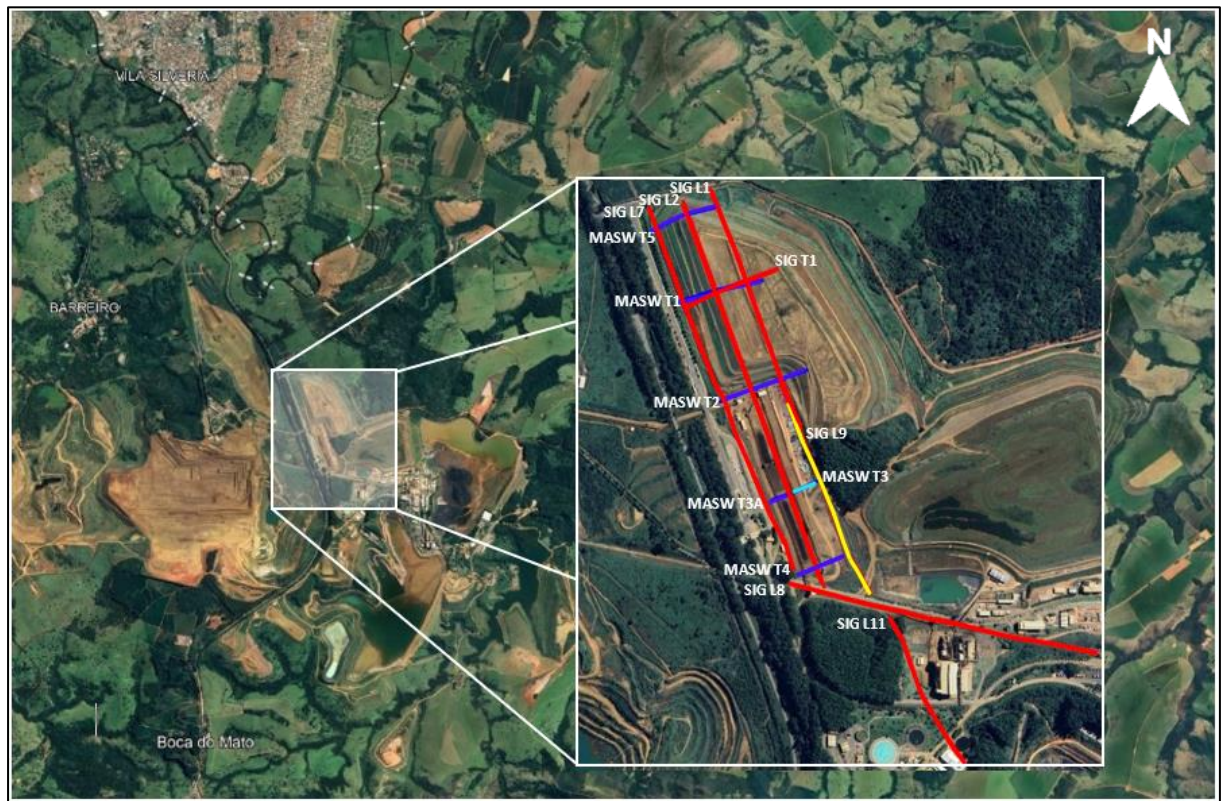


Figura 4-1: Área de estudo. Fonte: Autor (2025).

As informações topográficas (Figura 4-2) foram empregadas para a elaboração das Plantas de Localização e das Seções de Imageamento Geolétrico (SIG's) e Perfis Sísmicos de Vs.

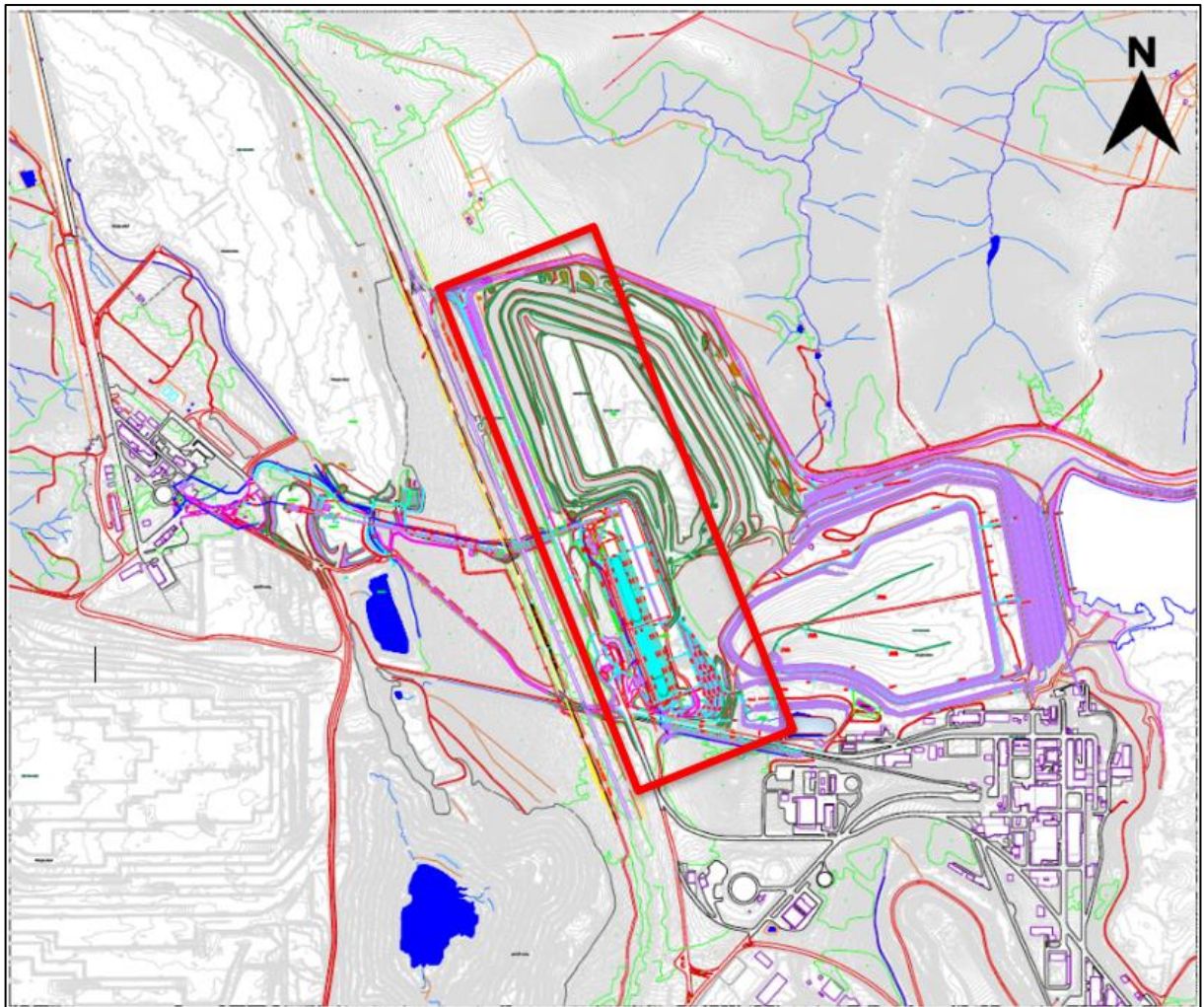


Figura 4-2: Mapa topográfico da região de estudo (destacando a área de estudo retângulo vermelho), com as curvas de níveis. Fonte: Autor (2025).

4.2. Equipamentos do Levantamento Eletorresistivo

Os trabalhos foram realizados utilizando-se o equipamento *Syscal Switch Pro* multieletrodo de 48 canais, fabricado pela *IRIS Instruments* (Figura 4-3), com cabos e conectores adaptados para coleta de dados em sistema multieletrodos.



Figura 4-3: Syscal Switch Pro - Eletorresistivímetro digital multi-eletrodo utilizado durante a aquisição.
Fonte: Autor (2023).

O emprego do eletorresistivímetro multieletrodo permitiu programar o software de inversão de dados chamado Res2DInv de modo a varrer o perfil investigado através de vários pares de eletrodos em arranjo dipolo-dipolo (1xa, 2xa, 3xa etc.) e a coletar dados de campo em alta densidade de pontos de leitura, além da otimização da máxima profundidade de investigação. Desta forma, o espaçamento de 10 m entre eletrodos permitiu a amostragem desde as porções mais rasas da subsuperfície, até uma profundidade máxima de cerca de 100 m. Como exemplo, na Figura 4-4 se encontra o diagrama de aquisição de dados de eletorresistividade efetuado ao longo do alinhamento L1.

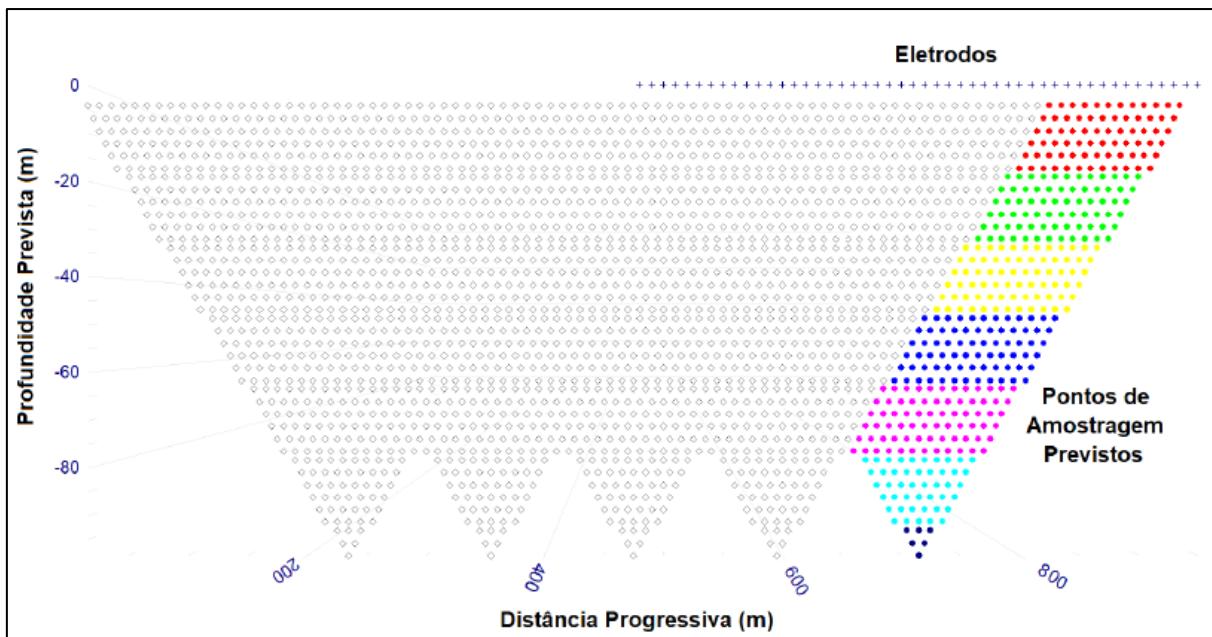


Figura 4-4: Diagrama de aquisição de dados na área de estudo do alinhamento L1. Fonte: Autor (2023).

4.3. Equipamentos do Levantamento Sísmico

O equipamento usado para este levantamento foi um sismógrafo digital composto por amplificadores, filtros analógicos e conversor analógico/digital de 24 bits, modelo GEODE da *Geometrics Inc. (USA-2010)*, e um microcomputador tipo *notebook* (Figura 4-6). O controle do sistema é obtido por meio de *software* que controla a taxa de amostragem, tempo total de registro e demais parâmetros de aquisição, assim como apresenta os dados na tela, em forma de sismogramas. Os dados são gravados em arquivos no próprio disco rígido do microcomputador.

Foram utilizados geofones de baixa frequência (4,5 Hz) espaçados em 5 m, com arranjos de geofones (bases sísmicas) com 115 m de extensão.

Para cada base sísmica MASW, foram realizados oito pontos de impacto da marreta, efetuados na seguinte configuração:

Dois tiros externos ao arranjo, a 15 m e a 5 m antes do primeiro geofone;

Nas posições dos geofones G4, G8, G12, G16, G20;

Um tiro externo, 5 m depois do último geofone.



Figura 4-6: Sismógrafo GEODE e notebook utilizados nos trabalhos. A tela do computador apresenta o software que controla e gerencia a coleta dos dados sísmicos, permitindo o controle de qualidade. Fonte: Autor (2023).

As bases MASW foram implementadas em progressivas sucessivas, possibilitando a amostragem da subsuperfície (pontos de amostragem – 1D) a cada 10 m. A Figura 4-5 apresenta um esquema das bases de MASW.

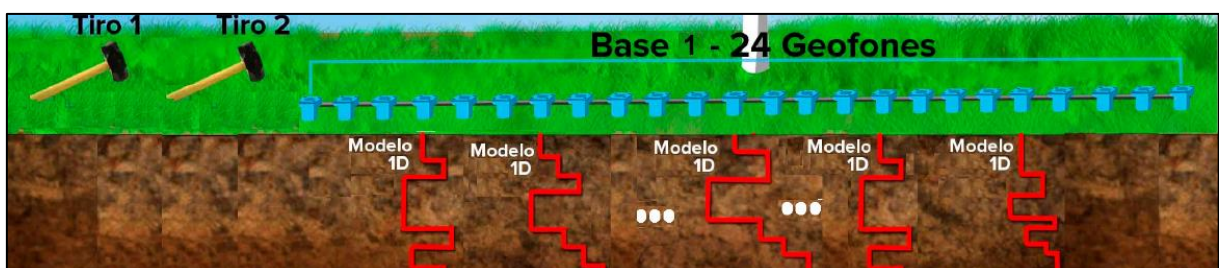


Figura 4-5: Exemplo de aquisição dos dados MASW com uso de uma base fixa, onde sucessivos pontos de geração das ondas sísmicas (8 pontos de tiro walk-away) de forma a ser possível extrair perfis 1D a cada 10 m, utilizados para geração das seções MASW 2D. Fonte: Autor (2023).

Para o processamento, inversão das curvas de dispersão, obtenção dos modelos 1D e interpolação para as seções 2D dos dados MASW, foi utilizado o *software* SurfSeis Ver. 6.2 (Kansas Geological Survey - 2019).

A Tabela 4-1 e a

Tabela 4-2 mostram a extensão de todas as linhas geoeletricas e sísmicas realizadas, respectivamente. O montante total foi de 6.290 metros lineares em 07 Seções de Imageamento Geoeletrico (SIG's) e 1.175 metros lineares em 05 Perfis Sísmicos de Vs.

Tabela 4-1 - Extensões dos alinhamentos geoeletricos implantados na área do Pátio de Homogeneização

SIG	L1	L2	L7	L8	L9	L11	T1	Total
Extensão (m)	950	1.430	1.430	950	710	470	350	6.290

Fonte: Autor (2023).

Tabela 4-2: Extensões dos alinhamentos sísmicos implantados na área do Pátio de Homogeneização.

Perfil Sísmico	T1	T2	T3A	T3	T4	T5	Total
Extensão (m)	290	295	85	100	175	230	1.175

Fonte: Autor (2023).

Em levantamentos pelo método sísmico MASW, a recomendação é que os alinhamentos não sejam implantados em terrenos com variações acentuadas nas elevações. Idealmente, este tipo de levantamento deve ser realizado em terreno plano ou em aclave/declive constante, como exemplifica o esquema da Figura 4-7. Grandes variações de topografia podem ocasionar em falseamentos das velocidades Vs mapeadas em subsuperfície. Assim, não é recomendável a

aplicação deste tipo de levantamento em trechos que interceptem subida de taludes. Os triângulos representam os alinhamentos de geofones, cravados em terrenos com diferentes topografias. O caso exemplificado no canto inferior direito não é recomendado, uma vez que apresenta grande diferença de declive ao longo da linha.

Como as linhas programadas tinham trechos de subida em taludes, a equipe em campo

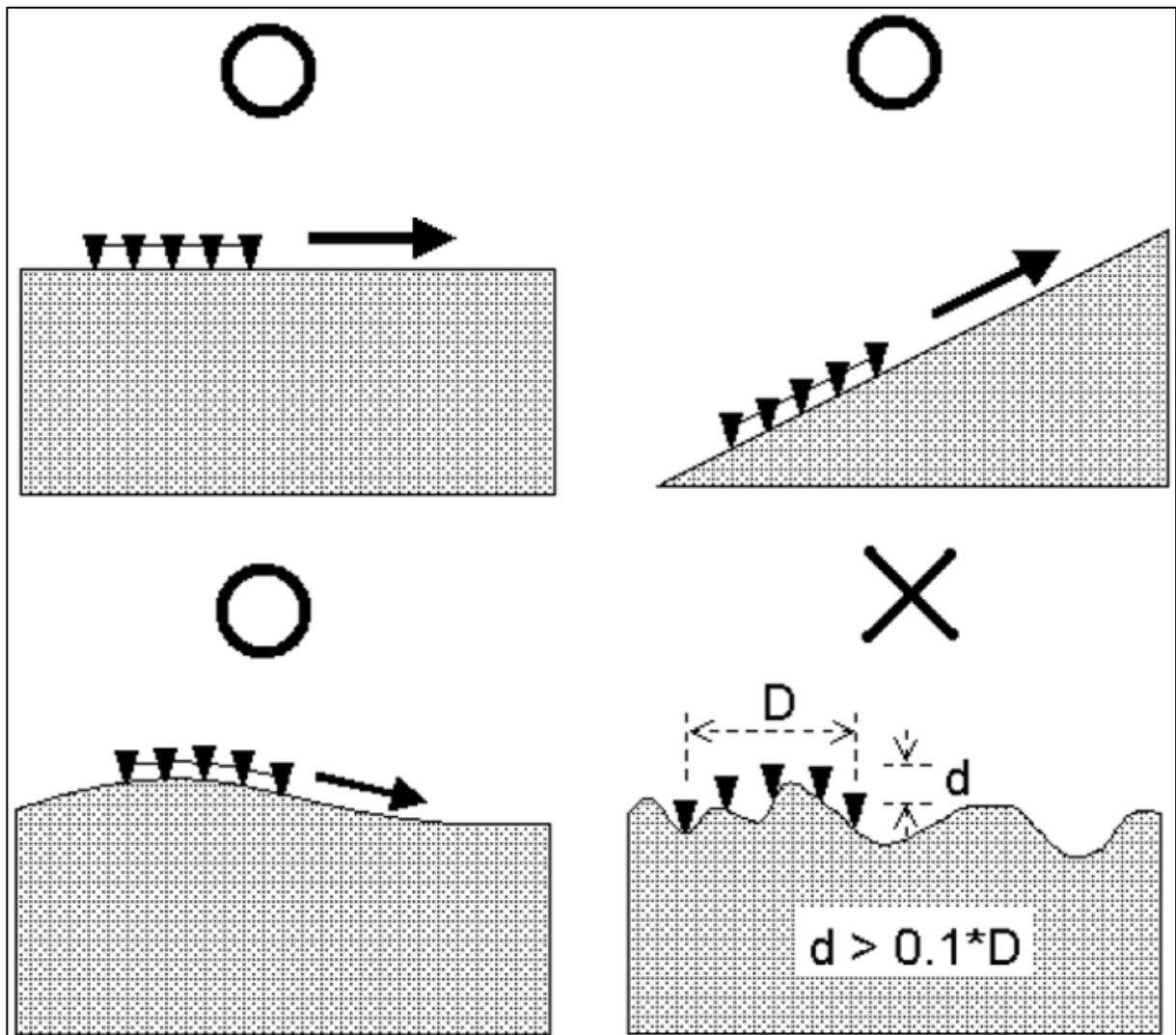


Figura 4-7: Esquema exemplificando diferentes casos de aplicação do método sísmico MASW. Fonte: Adaptado de Kansas Geological Survey, SurfSeis/MASW Workshop (2014).

realizou um espaçamento maior entre as bases de geofones, cravando-os apenas nos trechos com a cota constante dos taludes. Este procedimento foi necessário para evitar o falseamento das velocidades mapeadas. Porém, também ocasiona por vezes em perda de investigação nos trechos entre a base e o pé do talude, bem como no trecho da crista do talude para o plano seguinte.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Levantamento Eletrorresistivo

A seguir são tecidas considerações e apresentados os resultados do levantamento eletrorresistivo.

5.1.1. *Premissas do Modelo Geoelétrico*

Os modelos geofísicos procuram representar a subsuperfície através de parâmetros físicos medidos indiretamente, após a aplicação de algum fenômeno físico na superfície do terreno. Desta maneira, devem ser entendidos como uma representação simplificada da subsuperfície e precisam ser interpretados através de algumas premissas básicas.

Conforme citado anteriormente, a presença da água em subsuperfície é o principal facilitador da condução da corrente elétrica por dissolver íons dos minerais, tornando o meio mais condutor (menos resistivo). Dessa forma, a ocorrência de percolação de fluidos no meio poroso (maior permeabilidade), solos saturados ricos em argilominerais ou rochas com elevado nível de alteração/fraturamento impõe uma diminuição substancial nos valores mapeados de resistividade. Por outro lado, porções secas (pouco permeáveis a impermeáveis) e maciços rochosos com suas propriedades físicas mais preservadas tendem a apresentar maiores valores de resistividade. Em síntese, podemos compilar as seguintes premissas:

- Quanto menores forem os valores da resistividade elétrica, maior deve ser a concentração de água no local, seja por ser um caminho preferencial do fluxo, seja por se tratar de uma região com maior permeabilidade/porosidade entre os grãos. No caso de ocorrerem no interior de maciços rochosos, há maior probabilidade de apresentarem elevados graus de alteração/fraturamento;
- Quanto maiores forem os valores da resistividade elétrica, maior deve ser a probabilidade de os materiais dificultarem o fluxo dos fluidos, ou mesmo se encontrar

secos, podendo se apresentarem mais compactos, mais adensados e/ou com menor porosidade/permeabilidade.

5.1.2. Correlação das Resistividades com os Tipos de Materiais

O parâmetro medido no método eletrorresistivo é a resistividade elétrica do meio, sendo a unidade de medida expressa por Ohm.m. É recorrente, em levantamentos geofísicos por Imageamento Geoelétrico, encontrar-se valores da ordem de unidades de Ohm.m até dezenas de milhares de Ohm.m, de acordo com as variações dos materiais existentes em subsuperfície e as suas reais condições físicas.

Na literatura científica existem algumas compilações correlacionando intervalos de resistividade elétrica com os diferentes tipos litológicos. Da Figura 5-1 à Figura 5-4 demonstram algumas dessas compilações. Os materiais podem apresentar amplos intervalos nos valores de resistividade. Por isso, para caracterizações geológicas mais específicas, é importante algum conhecimento prévio da geologia local.

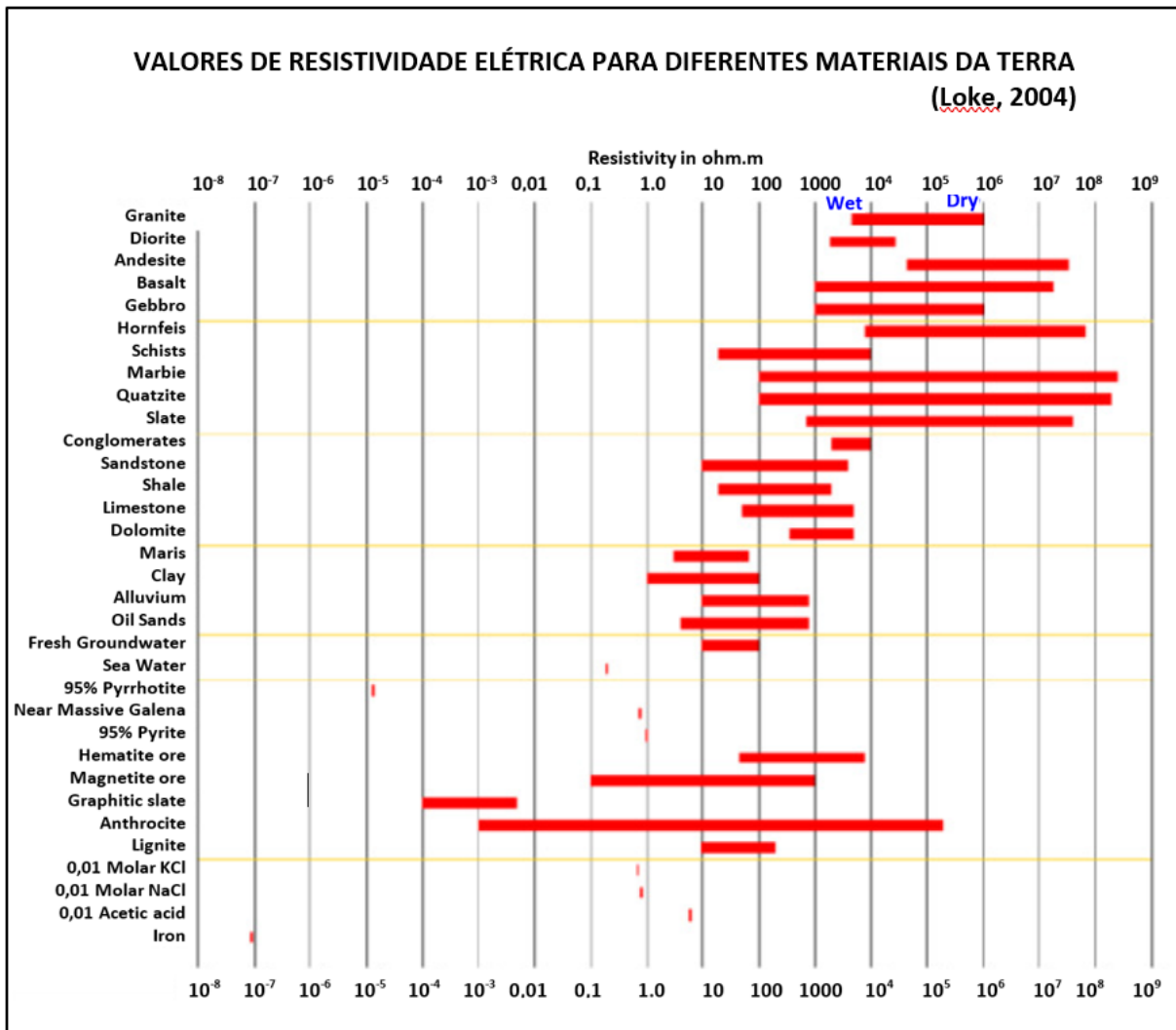


Figura 5-1: Compilados dos intervalos de resistividade elétrica para diferentes tipos de materiais que compõe a subsuperfície da Terra. Fonte: LOKE (2004).

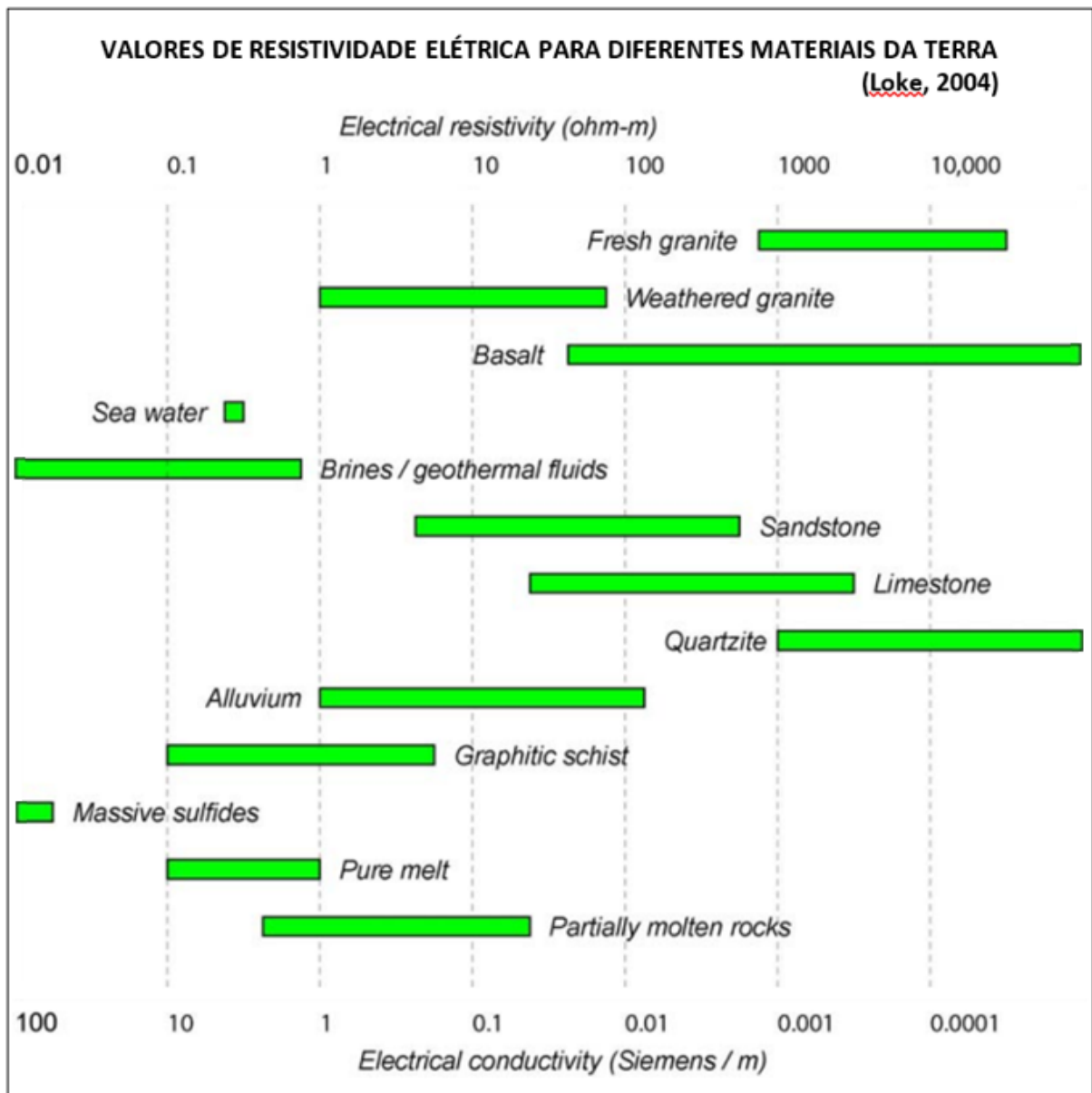


Figura 5-2: Compilados dos intervalos de resistividade elétrica para diferentes tipos de materiais que compõe a subsuperfície da Terra. Fonte: LOKE (2004).

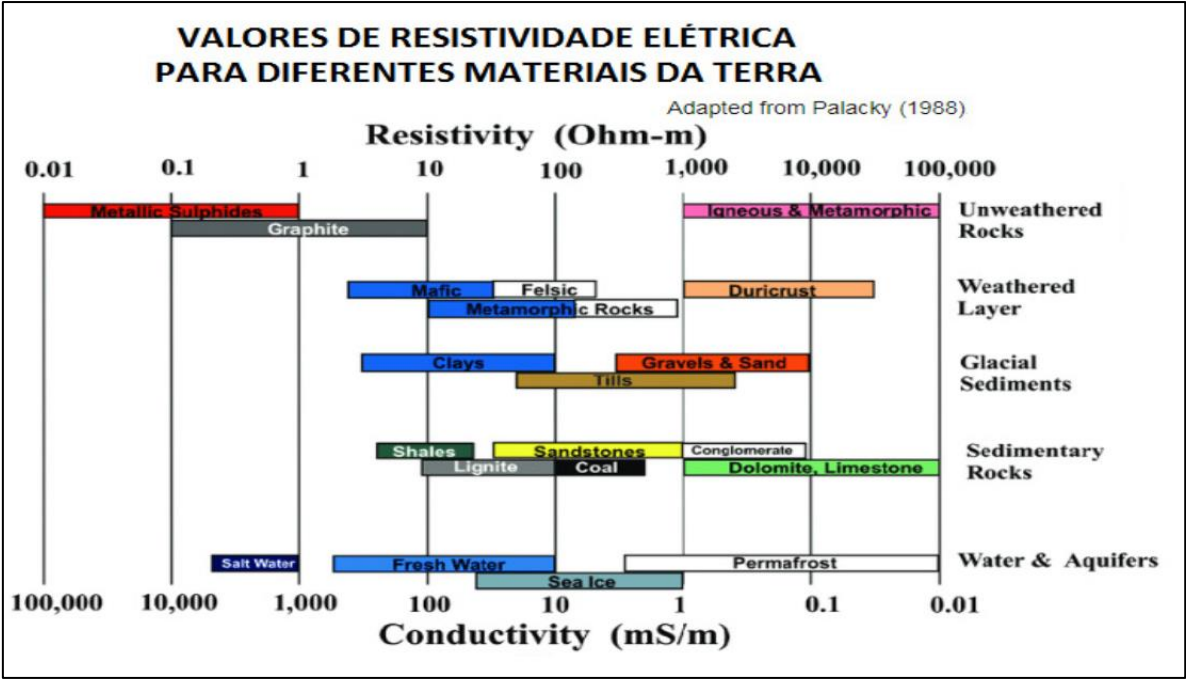


Figura 5-3: Compilados dos intervalos de resistividade elétrica para diferentes tipos de materiais que compõe a subsuperfície da Terra. Fonte: Fonte: PALACKY (1988).

COMPILADO COM VALORES DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA REGISTRADOS EM ROCHA GRANÍTICA POR DIFERENTES PESQUISADORES E DISTINTOS LOCAIS		
References	Type of granite	Electric resistivity (Ω m)
Ebert (1952)	Weathered granite (Bodetal/Harz)	160
	Weathered granite (Lindenfels/Odenwald)	1150
	Highly weathered granites (Bensheim/Odenwald)	490
	Fresh granite (Thale/Harz)	4300
Heiland (1963)	Granites in Washington DC	5×10^3
Telford et al. (1976)	Fresh granites	300 to 10^6
	Wet granitic porphyry	4.5×10^3
	Dry granitic porphyry	1.3×10^6
Reynolds (1997)	Fresh granites	300 to 10^6
	Weathered granites	30 to 500
Clausthal University of Technology	Falkenberg Granite (Bavaria)	310–3465

Figura 5-4: Valores de resistividade elétrica para rocha granítica determinados por alguns autores, em diferentes locais. Fonte: Fonte: PALACKY (1988).

A fim de uma melhor compreensão dos resultados e para efeito de comparação, a escala cromática apresentada em todas as SIG's foi padronizada, variando de resistividades inferiores a 25 Ohm.m a superiores a 100.000 Ohm.m, conforme demonstrado na Figura 5-5. Estes limites foram determinados respeitando-se os valores mínimos e máximos dos dados de resistividade elétrica presentes em todos os locais investigados. Assim, os termos baixas, intermediárias e altas resistividades são referentes unicamente ao intervalo de valores do presente levantamento. A Figura 5-6 apresenta a legenda com a síntese de todas as informações obtidas nas SIG's.

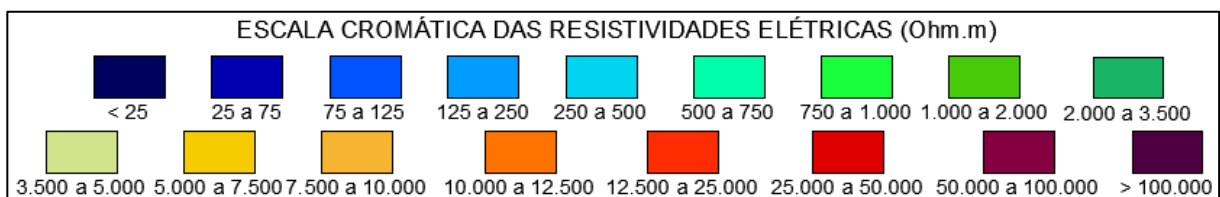


Figura 5-5: Escala cromática das resistividades elétricas utilizadas nas Seções de Imageamento (valores em Ohm.m). Fonte: Relatório interno (2023).

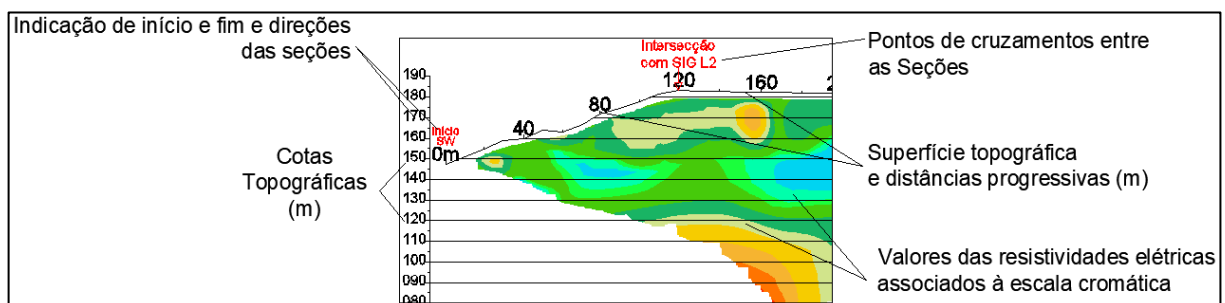


Figura 5-6: Síntese das informações apresentadas nas legendas das seções. Fonte: Relatório interno (2023).

Tendo em vista todas estas informações, elaborou-se uma classificação preliminar dos materiais em subsuperfície em termos das resistividades elétricas:

- **<25 a 500 Ohm.m (tons de azul)** – Estrato de Baixos Valores de resistividade elétrica – correlacionado às porções onde os materiais devem se apresentar com maior probabilidade de concentração de litotipos mais condutores de energia e/ou saturados. Pressupõe-se que estes fluidos apresentem maior concentração em sais dissolvidos (nos poros/interstícios), ou mesmo no interior de maciços rochosos, mas que devam apresentar

certo grau de alteração/fraturamento, permitindo desta forma a percolação em seu interior. Desta maneira, estes mais baixos valores (principalmente os abaixo de 250 Ohm.m) permitem delinear em subsuperfície todas as porções onde o fluxo dos fluídos deve ser favorecido;

- **500 a 3.500 Ohm.m (tons de verde)** – Estrato de Valores Intermediários de resistividade elétrica – correlacionado às porções de transição entre os estrados de baixos valores para os de altos valores, portanto é de se esperar que os materiais no interior deste estrato apresentem progressiva elevação da compactação, tornando o meio mais resistente ao fluxo dos fluidos subterrâneos (tendência de tornarem-se impermeáveis) e, se ocorrem no interior de maciços rochosos, estes devem apresentar redução nos graus de alteração/fraturamento conforme as resistividades aumentam;

- **3.500 a >100.000 Ohm.m (tons de amarelo, vermelho e roxo)** – Estrato de Altos Valores de resistividade elétrica – correlacionado aos materiais secos (impermeáveis) ou com baixas concentrações de água em seus poros intersticiais e, muito provavelmente, bastante compactados. Em profundidades maiores, devem representar maciços rochosos mais preservados.

5.1.3. Seções de Imageamentos Geoelétricos (SIG's)

O levantamento geoelétrico foi realizado, conforme detalhado no item 4.1, com linhas longitudinais paralelas, linha transversal, e linha diagonal. A seguir, algumas considerações sobre as Seções de Imageamento Geoelétrico (SIG's) obtidas e dispostas em RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO – R004/23 de 2023.

SIG L1:

A Figura 5-7 apresenta a SIG L1, cujo alinhamento foi implantado no sentido de NW para SE. Como citado no item 4.1.1, a ocorrência de baixos valores de resistividade (tons de azul) se correlaciona a uma provável concentração de litotipos naturalmente mais condutores de energia (argilas, por exemplo), mas também a porções onde os materiais podem apresentar elevação no teor de saturação nos poros intersticiais dos materiais, ou mesmo em porções mais

alteradas/fraturadas se ocorrerem em maciços rochosos. Assim, os materiais acometidos por baixos valores apresentam maior probabilidade de favorecerem a percolação de fluidos em subsuperfície, delineando desta forma os mais prováveis caminhos preferencias à percolação.

Na SIG L1, estas baixas resistividades foram mapeadas a partir da progressiva 100 m, onde ocorrem desde as porções superficiais do talude, trechos centrais do pátio em profundidades um pouco mais desenvolvidas (cotas inferiores a 1.170 m) e tendendo a aflorar no talude oposto, até a progressiva 220 m. Os baixos valores voltaram a ocorrer nas porções superficiais no trecho final da seção, a partir da progressiva 800 m. Baixos valores também foram mapeados em profundidades maiores apenas no trecho entre as progressivas 720 e 760 m. Todos estes locais são, pelas premissas do modelo, locais onde deve ocorrer percolação de fluidos, demarcando em subsuperfície os prováveis caminhos preferenciais.

No trecho central da seção, a porção mais superficial foi acometida por intermediários (tons de verde) a altos valores (tons de amarelo e vermelho), sugerindo um material pouco mais compactado e que devem dificultar a percolação. Intermediários e altos valores também foram mapeados nas porções mais profundas da seção, sugerindo possível transição para materiais pouco permeáveis ou mesmo maciços rochosos mais competentes.

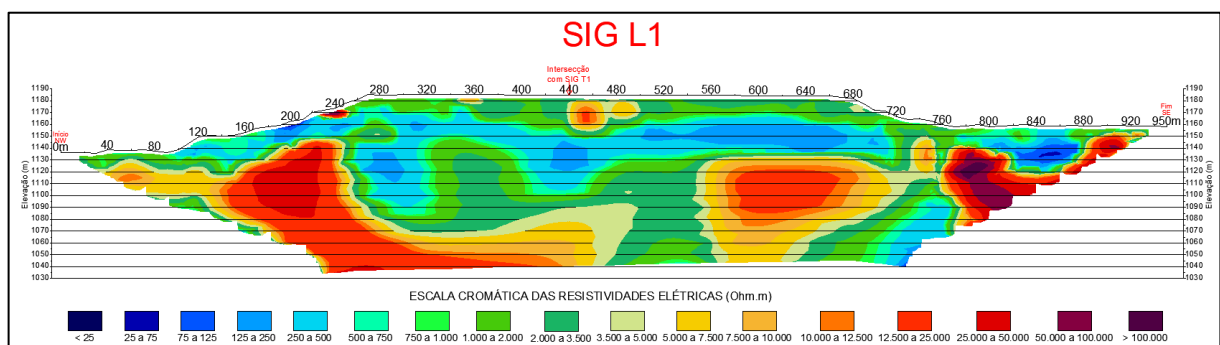


Figura 5-7: Seção de Imageamento Geoeletrico L1. Fonte: Relatório interno (2023).

SIG L2:

O alinhamento L2 foi implantado paralelo ao L1, cerca de 100 m a oeste e com maior extensão, chegando a 1.430 m. A Figura 5-8 mostra a SIG L2. A primeira metade da seção (trecho a NW) é dominada por intermediários a altos valores de resistividade (tons de verde a amarelo e laranja), sugerindo que estes materiais devem apresentar certo teor em fluidos, mas

que devem impor dificuldades à percolação de fluidos, ou mesmo sem a presença de fluidos (secos), principalmente nos núcleos de mais altos valores (tons de vermelho/roxo). Apenas alguns locais pontuais apresentaram baixos valores (tons de azul), que apresentam maior probabilidade de favorecerem o fluxo dos fluidos em trechos isolados.

Já a segunda metade da seção (trecho a SE) apresentou grande contraste de resistividade, com predomínio de baixíssimos valores ($< 25 \text{ Ohm.m}$, tons de azul escuro) ocorrendo a partir da progressiva 750 m, logo após a descida do talude existentes (delimitando a área do pátio) e em porções inferiores à cota 1.140 m. Estas baixíssimas resistividades são sugestivas ou de litotipos bastante condutores (minerais metálicos, por exemplo) ou de materiais saturados em fluidos ricos em sais dissolvidos, tornando o meio bastante condutor de energia. Estas ocorrências persistiram até as máximas profundidades mapeadas (elevação 1.030 m). Nestes trechos também ocorreram feições de altos valores, arredondadas e envolvidas pelo estrato de baixos valores, correlacionando-se a materiais provavelmente pouco permeáveis.

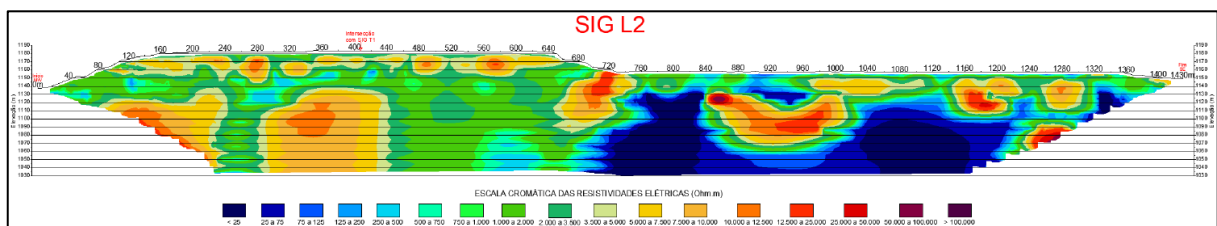


Figura 5-8: Seção de Imageamento Geoeletrico L2 Fonte: Relatório interno (2023).

SIG L7:

O alinhamento L7 foi realizado no sentido NW-SE (Figura 5-9) e é a mais extensa dessa campanha geofísica com 1.430 m de extensão, sendo também o alinhamento mais a oeste da campanha. O alinhamento intercepta a SIG L5 na progressiva 80 m. Ao longo de toda a seção, próximo a superfície, foi registrada uma delgada camada que alternou entre estratos de intermediária a alta resistividade, sendo que, a alguns poucos metros abaixo, adentrou numa extensa camada de alta resistividade onde existem vários núcleos de altíssima resistividade. Essa feição de alta-altíssima resistividade se estendeu por praticamente toda a seção, porém do início até a progressiva 840 m (lado NW) a espessura foi maior do que pós a progressiva 840 m (lado SE). A transição de estratos geoeletricos de alta para baixa resistividade ocorre de forma plano-paralela, contudo a profundidade oscila ao longo da seção.

Próximo a progressiva 840 m foi mapeada uma interessante feição geoeétrica de baixíssima resistividade. Esta feição interrompeu a camada praticamente contínua de alta resistividade e se aprofunda até a máxima profundidade investigada, sendo que no flanco do lado NW o contato subverticalizado com o material de alta resistividade ocorreu desde próximo da superfície até a elevação de 1.040 m, enquanto no flanco do lado SE o contato geoeétrico subverticalizado com o material de alta resistividade ocorreu nos níveis mais profundos da investigação. Inclusive esse estrato de altíssima resistividade que se inicia abaixo da progressiva 880 m se prolonga até o final da seção, com a tendência de emergir à medida que se avança para o final da seção, lado SE, com feição de uma falha geológica.

Ressalta-se que este mesmo estrato de altíssima resistividade deve ser continuidade do mesmo material também registrado na seção L9.

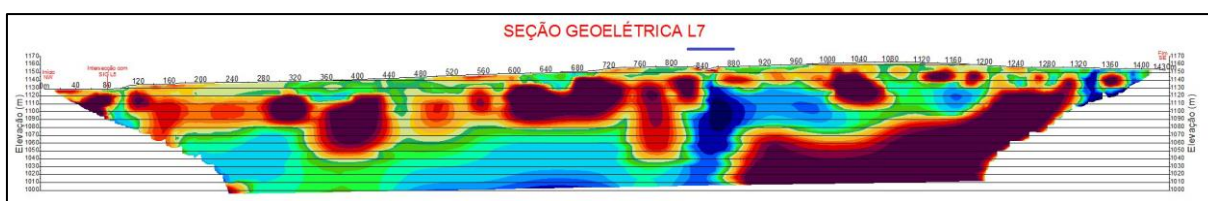


Figura 5-9: Importante diferenciação no comportamento dos estratos geoeétricos da progressiva 0 até 840 m, para o trecho posterior a progressiva 840 m. Fonte: Relatório interno (2023).

SIG L8

O alinhamento L8 foi realizado no sentido NW-SE (Figura 5-10) e possui 950 m de extensão e tem interseção com o anel de quartzito que circunda o domo mineralizado do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Araxá. Foi observado que o comportamento dos estratos geoeétricos difere muito das demais seções, com exceção da SIG L11 que também tem interseção com o anel de quartzito (Figura 5-11). A seção apresentou núcleos isolados de alta resistividade de diferentes dimensões próximo da superfície todos eles envolvidos por um estrato geoeétrico de baixíssima resistividade (tons de azul escuro), sendo que nos níveis mais profundos da seção foram mapeadas feições geoeétricas de alta resistividade, porém de forma descontínua. Os trechos de baixíssima resistividade foram projetados para a superfície e demarcados por um traço em azul e conforme pode-se notar, na maior parte da seção os estratos

de baixíssima resistividade se aprofundaram desde muito próximo da superfície até a máxima profundidade de investigação.

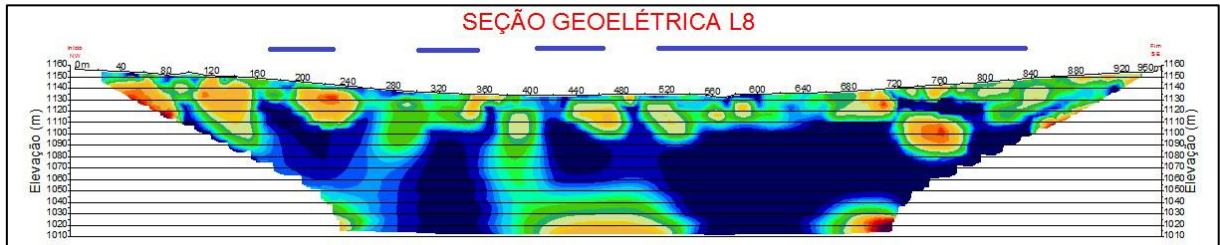


Figura 5-10: Seção de Imageamento Geoelétrico (SIG L8). Fonte: Relatório interno (2023).

Na Figura 5-11 pode-se observar e relacionar a interseção da SIG L8 com o anel de quartzito que circunda o domo mineralizado do Complexo Alcalino-carbonatítico de Araxá, no sentido NW-SE. Como esse anel é de rocha muito fraturada, sugere-se que a imagem da SIG L8 é representativa quanto a regiões predominantemente de baixas resistividades.



Figura 5-11: Interseção da SIG L8 com o anel de quartzito do CACA. Fonte: Autor (2025).

SIG L9

O alinhamento L9 possui 710 m de extensão e foi realizado no sentido NW-SE (Figura 5-12). O alinhamento é a continuidade da SIG L1, que em parte se sobrepõem e, está praticamente paralelo ao da SIG L7 e tem o seu início próximo a progressiva 840 m da SIG L7. Isto é importante citar, pois o comportamento dos estratos geoeletricos mapeados na SIG L9 é praticamente idêntico ao observado na SIG L7. Tal fato reforça que existe uma continuidade dos estratos geoeletricos de altíssima resistividade mapeados tanto da SIG L7, como na SIG L9.

Vale ressaltar que próximo a progressiva 480 m foi mapeado um contato geoeletrico subverticalizado. Este contato pode estar correlacionado a presença de uma falha geológica, pois a transição entre os estratos de altíssima para baixíssima resistividade é muito brusca, inclusive, a projeção do trecho de baixíssima resistividade foi demarcada na seção e se estende deste a progressiva 480 m até 580 m, com a tendência de se estender até a intersecção com a SIG L8.

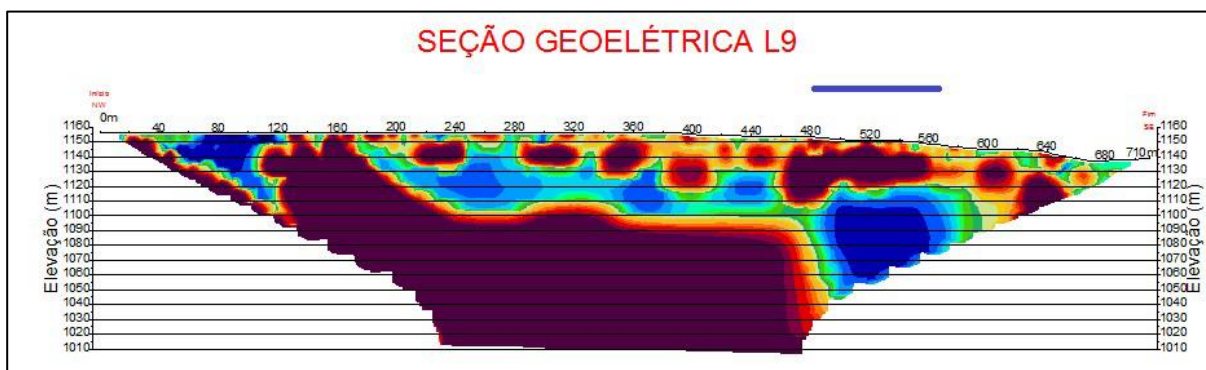


Figura 5-12: Seção de Imageamento Geoeletrico (SIG L9). Fonte: Relatório interno (2023).

SLI L11

O alinhamento L11 possui 470 m de extensão e foi realizado no sentido NW-SE (Figura 5-13). Este alinhamento seria continuidade da SIG L9, mas como tem uma via de intenso movimento, a SIG L9 foi interrompida e retomada após a via com a designação de SIG L11. Assim como ocorreu na SIG L8, a SIG L11 tem intersecção com o anel de quartzito na direção NW-SE (Figura 5-14) e, de certa forma, o comportamento dos estratos geoeletricos mapeados apresenta o mesmo comportamento registrado na SIG L8, ou seja, núcleos de alta a altíssima resistividade próximo da superfície e logo abaixo estratos de baixíssima resistividade elétrica,

sendo que no lado NW ainda foi mapeada nos níveis mais profundos um trecho com alta resistividade, que devido a extensão do alinhamento não ficou muito bem caracterizado a sua continuidade, principalmente no lado inicial.

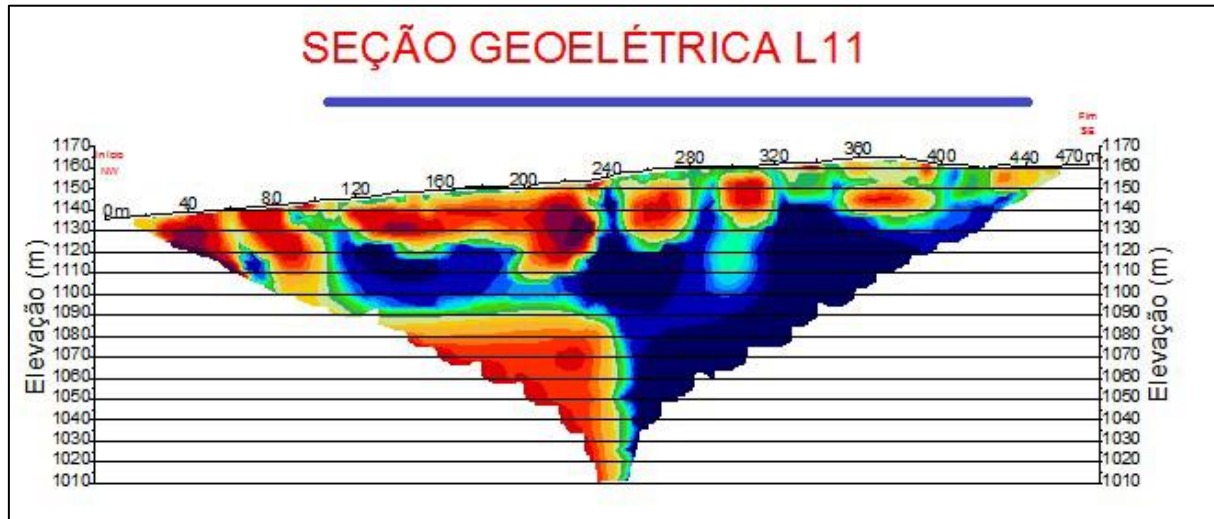


Figura 5-13: Seção de Imageamento Geolétrico (SIG L9). Fonte: Relatório interno (2023).

Na Figura 5-14, assim como na SIG L8, pode-se observar e relacionar a interseção da SIG L11 com o anel de quartzito que circunda o domo mineralizado do Complexo Alcalino-carbonatítico de Araxá, no sentido NW-SE e com comportamento dos estratos geolétricos mapeados seguindo a mesma tendência da SIG L9, com vários núcleos de alta a altíssima resistividade mapeados próximo da superfície e logo abaixo estratos de baixíssima resistividade.



Figura 5-14: Interseção da SIG L11 com o anel de quartzito do CACA. Fonte: Autor (2025). Fonte: Autor (2025).

SIG T1:

O alinhamento T1 foi implantado no sentido de SW para NE, e os interceptando nas progressivas 120 m (L2) e 220 m (L1). A Figura 5-15 mostra a SIG T1, onde os baixos valores de resistividades (tons de azul) foram mapeados contidos entre as cotas 1.175 m e 1.135 m, ocorrendo a partir da progressiva 160 m e em uma pequena feição na progressiva 80 m. São locais correlacionados a materiais naturalmente condutores bem como saturados, que devem favorecer o fluxo dos fluidos em subsuperfície.

Em profundidades maiores foi mapeada uma transição para intermediários a altos valores sugerindo materiais mais compactados (que devem dificultar o fluxo dos fluidos), ou mesmo a presença de maciços rochosos competentes. Esta transição corrobora (com certa margem de incerteza) as posições de transição para elevados valores mapeados nas duas SIG's anteriores (L1 e L2).

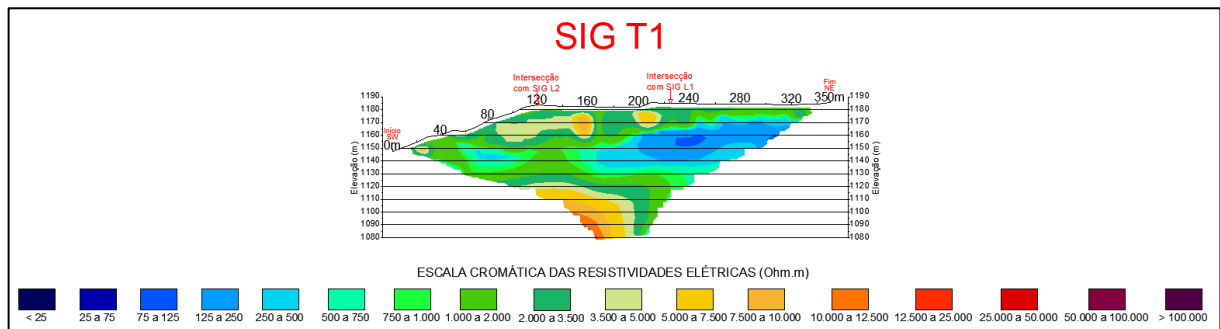


Figura 5-15: Seção de Imageamento Geolétrico (SIG T1). Fonte: Relatório interno (2023).

5.1.4. Interpretação dos Resultados Geolétricos

Os resultados do levantamento geolétrico contêm os intervalos de resistividade elétrica associados a uma escala cromática (imageamento) e as principais feições geolétricas foram interpretadas e destacadas nas legendas das figuras relacionadas. Os resultados do levantamento sísmico contêm os intervalos de velocidades sísmicas Vs também associados a uma escala cromática e as principais feições sísmicas foram interpretadas e destacadas nas legendas das figuras relacionadas.

As imagens obtidas nas seções 2D permitiram identificar três unidades geolétricas distintas, em função das diferentes faixas de resistividade elétrica associada à escala cromática utilizada, como segue:

- **<25 a 500 Ohm.m (tons de azul)** – Estrato de Baixos Valores de resistividade elétrica – correlacionado a litotipos naturalmente condutores de energia e/ou saturados. São todos os locais que devem favorecer a percolação dos fluidos, delineando, desta forma, os caminhos preferencias ao fluxo dos fluidos;
- **500 a 3.500 Ohm.m (tons de verde)** – Estrato de Intermediários Valores de resistividade elétrica – correlacionado a materiais que devem, progressivamente, dificultar o fluxo dos fluidos em subsuperfície (tendência de tornarem-se impermeáveis);

- **3.500 a >100.000 Ohm.m (tons de amarelo, vermelho e roxo)** – Estrato de Altos Valores de resistividade elétrica – correlacionado aos materiais impermeáveis (provavelmente secos) e, muito provavelmente, bastante compactados. Em profundidades maiores, devem representar maciços rochosos mais preservados.

Todas as seções de imageamento geoeletrico (SIG's) mapearam porções de baixos valores de resistividade que, pelas premissas do modelo geoeletrico, foram correlacionadas a prováveis percolações de fluidos. Em especial, o trecho mais a SE da SIG L2 apresentou baixíssimos valores de resistividade (<25 Ohm.m) e que persistiram até as máximas profundidades investigadas, sugerindo predomínio de litotipos bastante condutores (minerais metálicos, argilominerais etc.) ou de materiais saturados, porém em fluidos ricos em sais dissolvidos. Já na seção geoeletrica, SIG L9, observou-se uma situação bastante peculiar, pois foram mapeados intensos contatos geoeletricos entre materiais de altíssima e de baixíssima resistividade, sendo o que mais chama a atenção ocorreu abaixo da progressiva 480 m, pois é um contato subverticalizado, que é uma típica assinatura de uma estrutura de falhamento, muito similar a registrada na SIG L7. Vale ressaltar que essa região está sob o local onde se encontra a parte de aterro na base do Pátio de Homogeneização.

5.2. Levantamento Sísmico MASW

A seguir são tecidas considerações e apresentados os resultados do levantamento sísmico por MASW.

5.2.1. *Premissas do Modelo Sísmico*

Conforme citado anteriormente, as velocidades das ondas sísmicas dependem essencialmente do meio por onde elas se propagam, podendo ser expressas pelas constantes elásticas e pela densidade do meio de propagação.

Dessa forma, o mapeamento da velocidade das ondas cisalhantes (velocidade V_s) permite uma correlação desta V_s com as propriedades mecânicas do material que compõe o meio de propagação. Porções de materiais terrosos pouco compactados tendem a apresentar os menores valores de V_s . Já porções mais compactadas tendem a apresentar valores de V_s mais elevados.

Em síntese, pode-se compilar as seguintes premissas:

- Quanto menores os valores de V_s , maior é a probabilidade de os materiais se encontrarem mecanicamente pouco competentes, com baixa capacidade de suporte/resistência ao cisalhamento, sendo maior também a probabilidade de se encontrarem pouco compactados;
- Quanto maiores os valores de V_s , maior é a probabilidade de os materiais se encontrarem mecanicamente bem competentes, com alta capacidade de suporte/resistência ao cisalhamento, sendo maior também a probabilidade de o material se encontrar bastante compactado.

5.2.2. Correlação dos Valores de V_s com os materiais

As imagens apresentadas nas Seções 2D foram obtidas aplicando-se a escala cromática (Figura 5-16) para representar as variações das velocidades V_s nas diferentes faixas de profundidades investigadas (desde <100 m/s a mais de 1.000 m/s).

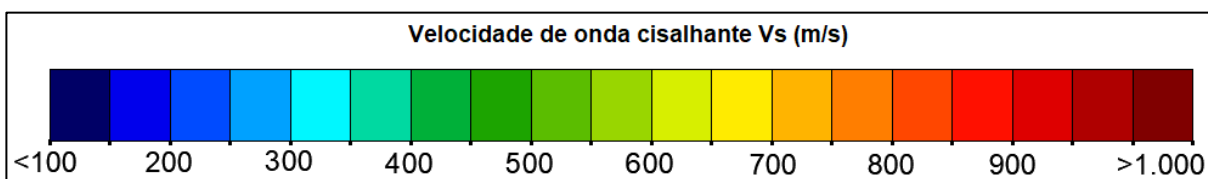


Figura 5-16: Escala cromática com os intervalos de velocidade sísmica da onda cisalhante V_s . Passos a cada 50 m/s. Fonte: Relatório interno (2023).

Por solicitação do Congresso Americano, o Programa Nacional de Redução de Riscos Sísmicos (NEHRP – *National Earthquakes Hazard Reduction Program*) apresentou, em 1977, um critério para classificar os materiais em subsuperfície em termos das velocidades V_s conforme Tabela 5-1. Desde então, este critério vem sendo utilizado como uma forma de

classificação dos terrenos para se adotar medidas de segurança contra a mitigação de riscos sísmicos e em outros projetos em geotecnia. Salientamos que esta classificação sugerida pelo órgão americano é uma primeira aproximação como referência das propriedades mecânicas dos materiais da subsuperfície por associação às velocidades V_s , de modo a facilitar o uso e inclusão das informações sísmicas na tomada de decisões pelo projetista.

Tabela 5-1: Classificação sísmica das localidades de acordo com o intervalo de velocidade das ondas cisalhantes V_s .

Classes	Velocidade S (V_s) (m/s)
A (Rocha dura)	> 1500
B (Rocha)	760-1500
C (Solo muito denso e rocha macia)	360-760
D (Solo duro)	180-360
E (Solo argiloso macio)	< 80
F (Solos que requerem resposta adicional)	< 180, e atendendo a algumas condições adicionais

Fonte: Relatório interno (2023).

Para as variações das velocidades obtidas nos perfis de V_s deste trabalho, podemos considerar que as porções mais superficiais, onde predominam baixas velocidades (tons de azul), se caracterizam como Classe D. Já as camadas de intermediárias velocidades (tons de verde a amarelo) se caracterizam como Classe C. Já nas porções mais profundas, a ocorrência de elevadas velocidades (tons de laranja a vermelho) sugere materiais mecanicamente mais competentes. Estas classificações através das faixas de velocidades V_s representam uma

poderosa ferramenta de investigação, podendo ser utilizada para subsidiar os projetistas quanto aos locais que, eventualmente, requerem especial atenção.

Com base nestas informações, foi elaborada uma síntese para os perfis sísmicos 2D, que secciona os estratos sísmicos em diferentes faixas de velocidades, associando-as aos materiais comumente encontrados na subsuperfície, como segue na Figura 5-17:

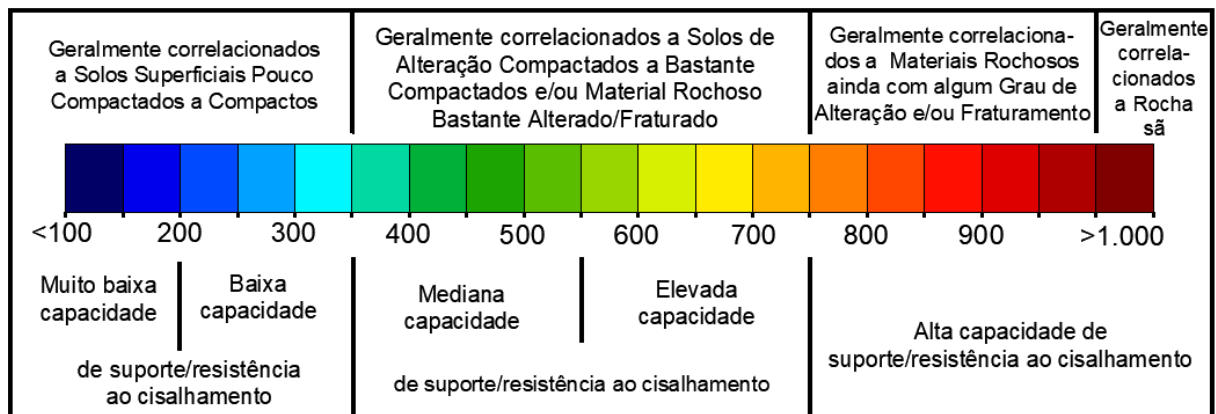


Figura 5-17: Classificação preliminar dos materiais da subsuperfície através do critério das faixas de velocidades da onda cisalhante (V_s). Fonte: Relatório interno (2023).

5.2.3. Apresentação e Módulo de Cisalhamento

A Figura 5-18 apresenta a legenda com a síntese de todas as informações obtidas no mapeamento sísmico V_s . Em complemento a estas informações, também foram estimados os Módulos de Cisalhamento (G_0), inferindo-se valores das densidades dos materiais.

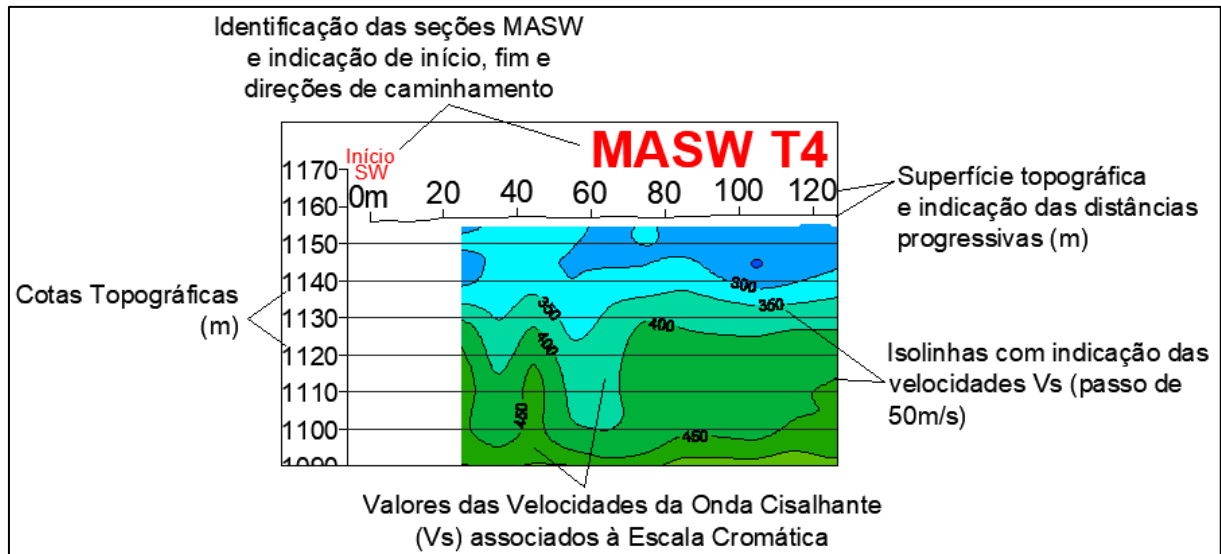


Figura 5-18: Legenda apresentada para os perfis sísmicos Vs. Fonte: Relatório interno (2023).

A Tabela 5-2 é um exemplo da apresentação dos resultados, relacionando as variações de Vs, os respectivos valores das densidades inferidas e as estimativas de G_0 em função das profundidades investigadas para a linha L1, progressiva 25 m.

Tabela 5-2: Apresentação do perfil sísmico Vs 1D do alinhamento L1 (progressiva 25 m), apresentando os valores de Vs e das estimativas de G_0 .

		25,0 m			
		Cota (m)	Velocidade (m/s)	Densidade (g/cm ³)	G (MPa)
Canadas	1 ^a	1.153,6	157	1,80	44
	2 ^a	1.150,7	203	1,85	76
	3 ^a	1.147,1	250	1,90	119
	4 ^a	1.142,6	294	1,95	169
	5 ^a	1.136,9	348	1,95	237
	6 ^a	1.129,9	411	2,00	338
	7 ^a	1.121,1	460	2,00	424
	8 ^a	1.110,1	493	2,10	511
	9 ^a	1.096,4	500	2,10	525
	10 ^a	1.081,5	616	2,20	836

Fonte: Relatório interno (2023).

5.2.4. *Perfis Sísmicos de Vs*

Os alinhamentos sísmicos foram implantados paralelos entre si e na direção SW-NE, todos transversais em relação às linhas geoeletricas L1 e L2. O alinhamento T3 foi dividido em dois trechos (T3A e T3) devido ao transportador de correia (TC-07), que se encontrava no local.

A Figura 5-19 mostra os perfis de Vs T1 a T5. No geral, todos os perfis apresentaram um horizonte superficial de baixos valores de Vs (tons de azul) de 20 a 30 m de espessura, correlacionado a materiais com relativas baixas capacidades de suporte geomecânico. Este estrato apresentou módulos de G_0 entre 36 e 245 MPa.

Subposto, foram mapeados intermediários valores de Vs (tons de verde e amarelo) até a máxima profundidade de investigação, correlacionados a materiais com medianas a elevadas capacidades geomecânicas, mas que ainda não devem representar materiais rochosos bastante competentes (rocha sã). Este estrato apresentou módulos de G_0 entre 248 e 1.465 MPa. Os materiais de maior competência geomecânica devem se encontrar em profundidades maiores do que a máxima profundidade de investigação, uma vez que não foram mapeados altos valores de Vs (tons de vermelho) nos perfis.

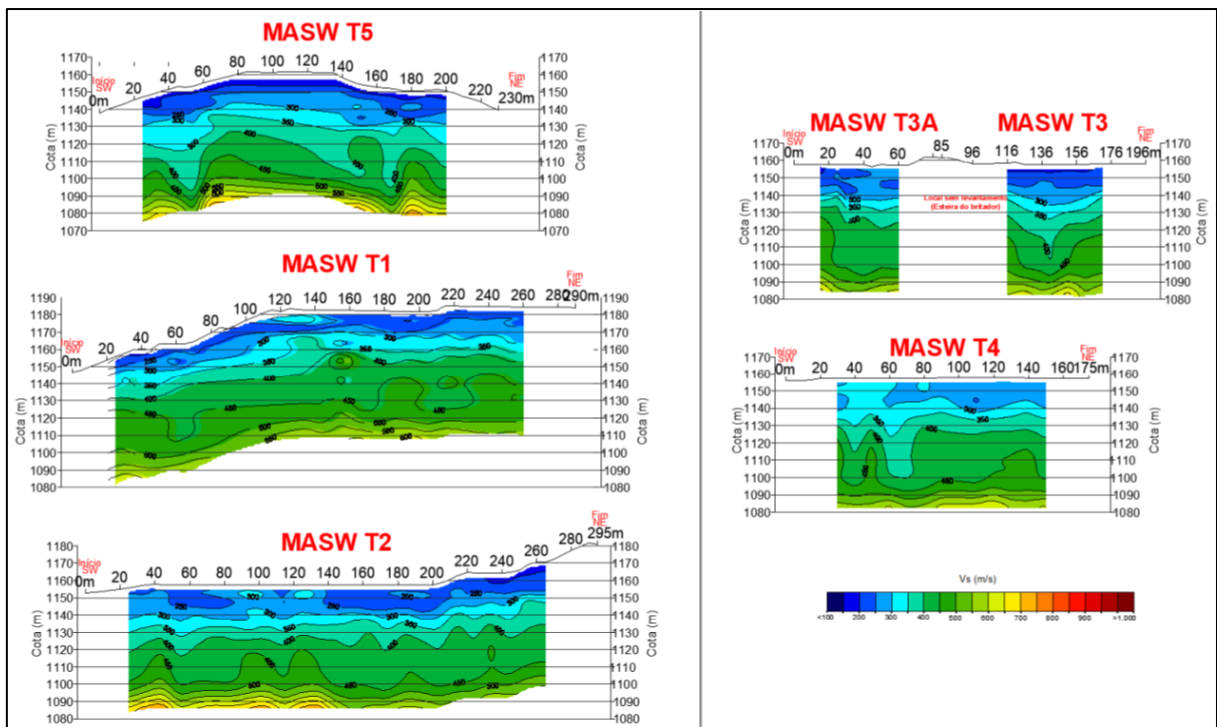


Figura 5-19: Perfis de Vs T1 a T5. Fonte: Relatório interno (2023).

5.2.5. Interpretação dos Resultados Sísmicos

O método Sísmico pela técnica MASW foi aplicado na área em 05 alinhamentos transversais (caminhamento de SW a NE), com o intuito de subsidiar os estudos geotécnicos, fornecendo parâmetros para avaliação das propriedades geomecânicas dos materiais, como os perfis de velocidade de onda cisalhante (Vs) e os módulos de rigidez inicial (G0).

Os perfis sísmicos permitiram a identificação de 03 estratos de velocidades Vs, relacionados com a resistência geomecânica dos materiais da seguinte maneira:

- **Estrato de Baixos Valores de Vs (<100 m/s a 350 m/s - camadas em tons de azul):** geralmente correlacionado a solos superficiais pouco compactados a compactados. As baixas velocidades sugerem muito baixas a baixas capacidades de suporte/resistência ao cisalhamento;

- **Estrato de Intermediários Valores de Vs (350 m/s a 750 m/s - camadas em tons de verde a amarelo):** geralmente correlacionado a solos de alteração compactados a bastante compactados e/ou material rochoso bastante alterado/fraturado. Os valores das velocidades sugerem medianas a elevadas capacidades de suporte/resistência ao cisalhamento;
- **Estrato de Altos Valores de Vs (>750 m/s - tons de vermelho):** geralmente correlacionados a materiais rochosos ainda com algum grau de alteração e/ou fraturamento. As altas velocidades sugerem materiais com alta capacidade de suporte/resistência ao cisalhamento.

5.3. Interpolação das Seções de Imageamento Geoelétrico com SPT's

Com as seções de imageamento geoelétricos apresentadas, foi feita uma seleção de alguns furos da Sondagem de Simples Reconhecimento, com STP, realizados no local antes da construção do aterro/terraplenagem do Pátio, utilizando como critério a coincidência de alinhamento e/ou a adjacência desses furos com as SIG's e em seguida foi realizada uma interpolação desses furos com as seções geoelétricas SIG L2 e SIG L9.

Não obstante, foram traçados nos perfis das seções geoelétricas os horizontes de SPT's, interpretativos, para aferição do modelo geoelétrico nas profundidades possíveis de acordo com cada furo.

Na Figura 5-21 e Figura 5-20 as seções geoelétricas SIG L2 e SIG L9 apresentam a interpolação dos furos selecionados posicionados de acordo com suas coordenadas e cotas nos perfis.

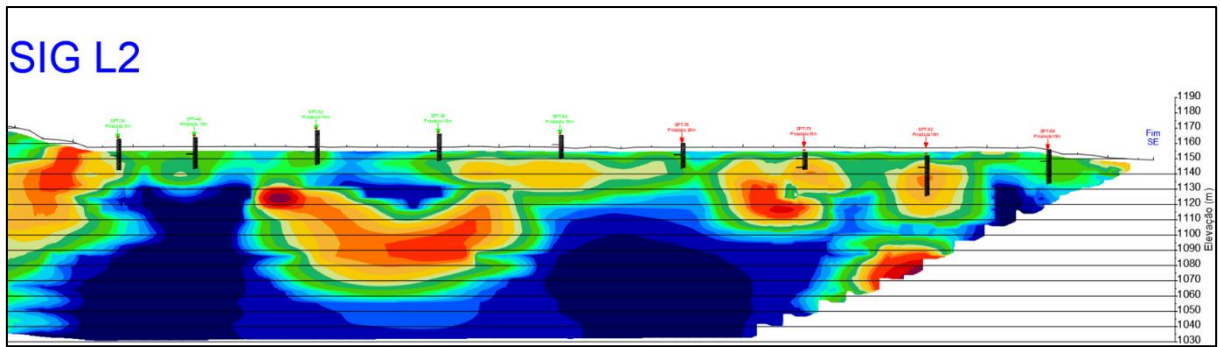


Figura 5-21: Seção de Imageamento Geolétrico L2 com interpolação dos furos SPT's. Fonte: Autor (2025).

A seguir (Figura 5-20) destaca-se alguns furos com os horizontes de STP's, interpretados, de acordo com a resistências de penetração em cada estrato. Na Figura 5-22 o furo SPT-66, próximo da progressiva 300, evidencia uma parte de sua estrutura e parte dos horizontes de SPT acima da cota do terreno atual, devido ao corte no terreno após os furos serem executados. Já a partir do furo SPT-72 que tem uma pequena parte de sua estrutura acima da cota do terreno atual, os estratos já estão concordantes com o terreno atual.

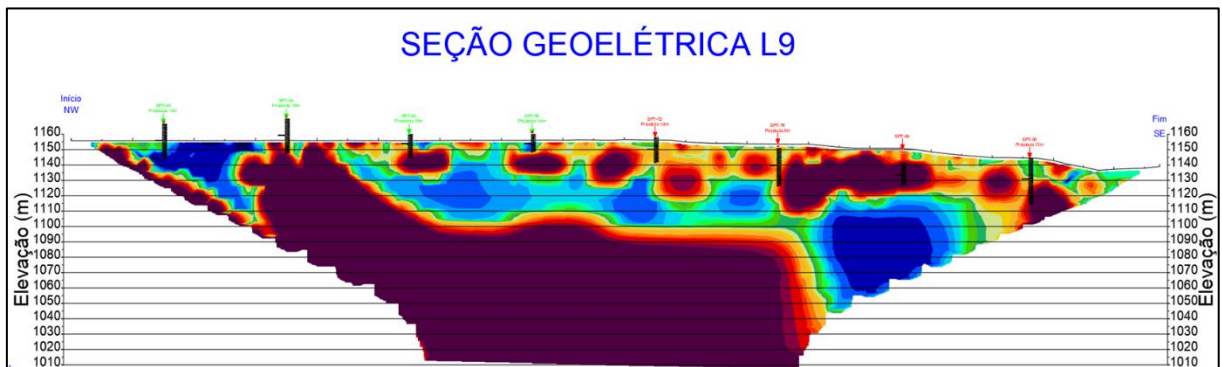


Figura 5-20: Seção de Imageamento Geolétrico L9 com interpolação dos furos SPT's. Fonte: Autor (2025).

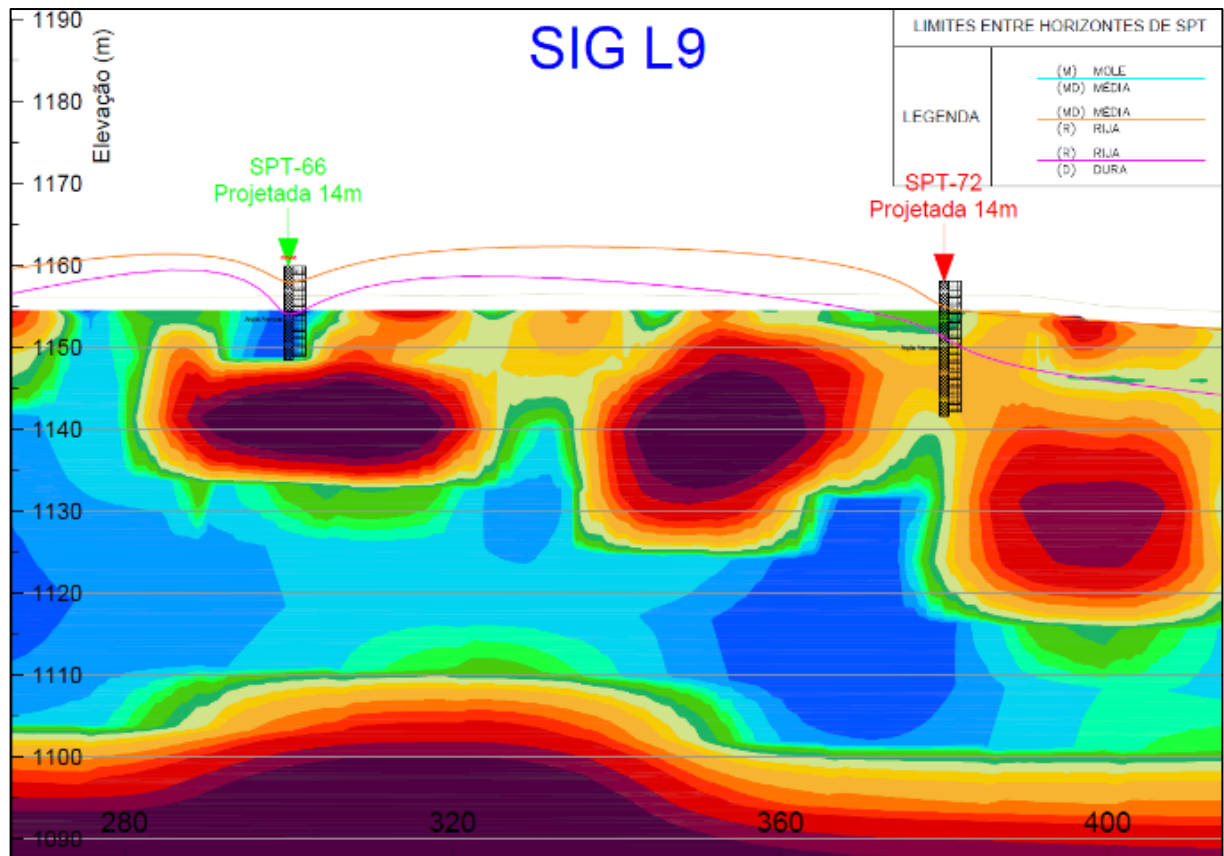


Figura 5-22: Seção de Imageamento Geolétrico L9 com interpolação dos furos (SPT-66 e 72) e limites entre horizontes de consistência/compacidade. Fonte: Autor (2025).

Entre as progressivas 440 e 480 o furo SPT-78, com 24,45 m de profundidade, apresentou que o horizonte de consistência rija/dura (linha rosa) está bem mais profundo que os horizontes mole/média e média/rija (linhas ciano e laranja), indicando correlação entre a SIG e a consistência pelo SPT, uma vez que dois blocos de maior resistividade estão ao seu lado. Já o SPT 84, que apesar de ser 10 m menor que o 78, apresentou todos os três horizontes de compacidade mais profundos por estar todo em uma zona maior resistividade, penetrando no bloco destacado entre as progressivas 520 e 560, conforme Figura 5-23.

Destaca-se também, na Figura 5-23, uma grande zona de baixa resistividade, de cores azuis, abaixo do bloco de alta resistividade, perfurado pelo SPT-84 e que fica ao lado do bloco de alta resistividade, de cores avermelhadas, ora interpretado com uma típica assinatura de falha geológica.

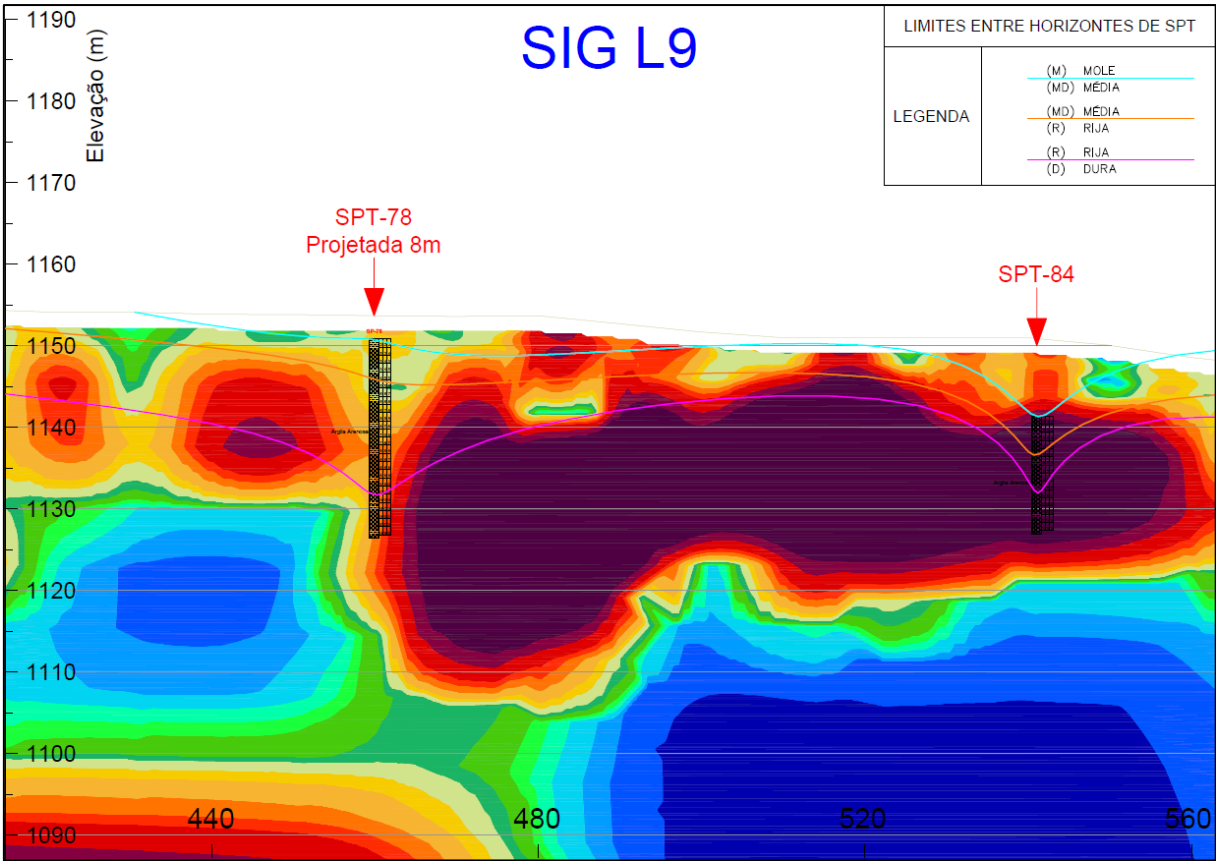


Figura 5-23: Seção de Imageamento Geoelétrico L9 com interpolação dos furos (SPT 78 e 84) e limites entre horizontes de consistência/compacidade. Fonte: Autor (2025).

Assim como no SPT 84, o SPT 90, entre as progressivas 600 e 640, evidencia os três horizontes de consistência/compacidade mais profundos, em que o horizonte de consistência rija/dura contorna os flancos de dois blocos de maior resistividade conforme ilustrado na Figura 5-24.

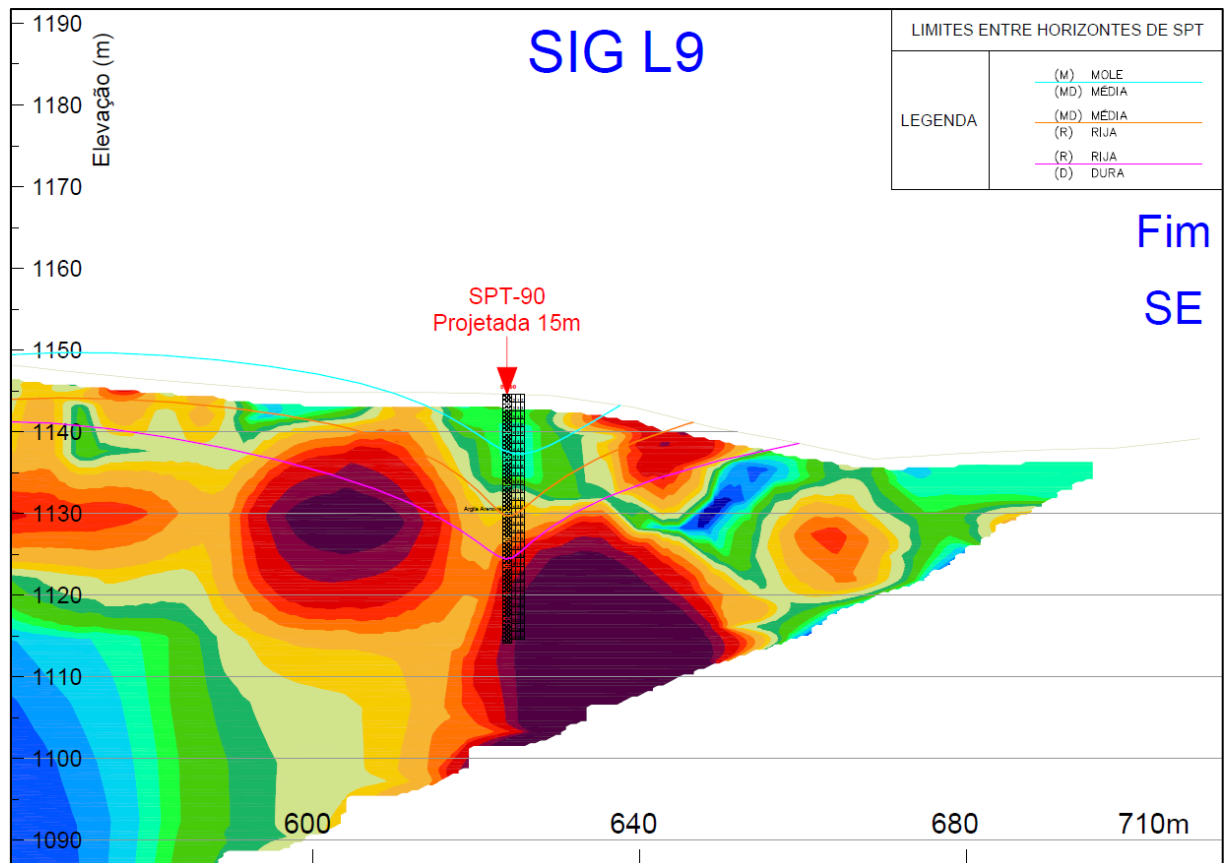


Figura 5-24: Seção de Imageamento Geoelétrico L9 com interpolação do furo SPT-90 e limites entre horizontes de consistência/compacidade. Fonte: Autor (2025).

Enquanto na Seção de Imageamento Geoelétrico SIG L9 os horizontes de consistência/compacidade têm maior variação de elevação, quando comparados ao perfil de resistividade, na seção SIG L2 a variação de elevação é menor, mas também em concordância com os estratos de resistividade.

Na Figura 5-25 e Figura 5-26, os limites entre horizontes de consistência/compacidade têm uma certa equidistância, variando nos contornos dos blocos de maior resistividade, indicando por interpretação, que há uma correlação de eletroresistividade e consistência/compacidade entre os modelos interpolados.

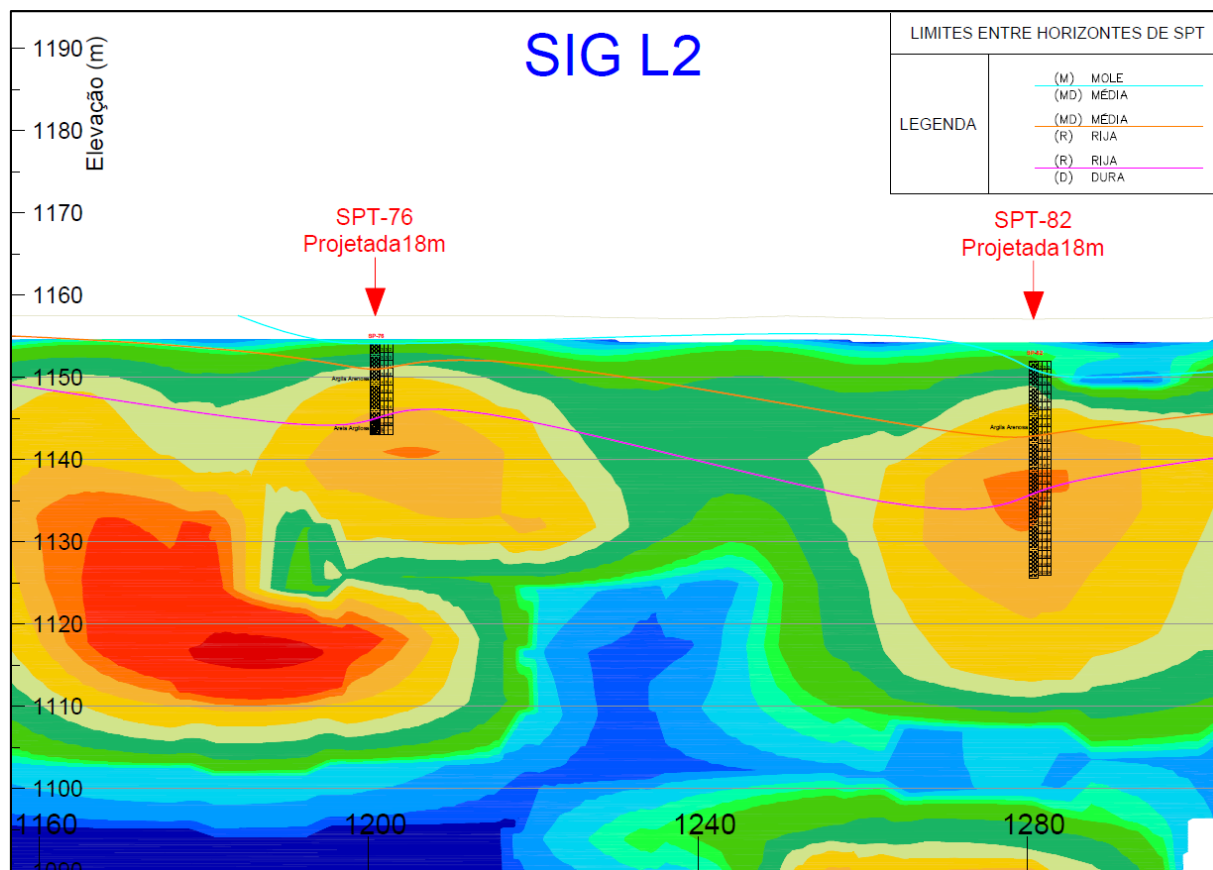


Figura 5-25: Seção de Imageamento Geométrico L2 com interpolação dos furos SPT-76 e 82 e limites entre horizontes de consistência/compacidade. Fonte: Autor (2025).

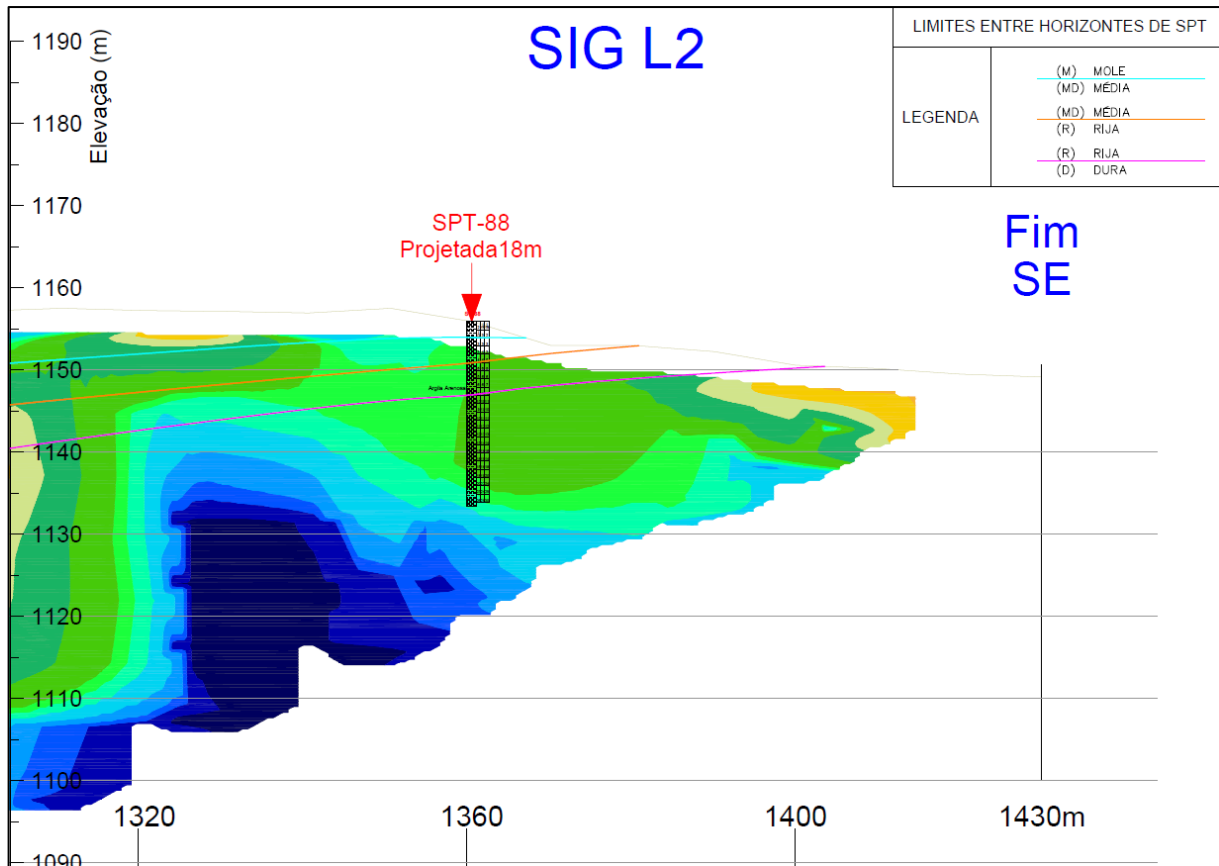


Figura 5-26: Seção de Imageamento Geoeétrico L2 com interpolação do furo SPT-88 e limites entre horizontes de compacidade. Fonte: Autor (2025).

5.4. Análise dos resultados de campo

Com os resultados obtidos e análise das Seções de Imageamento Geoeétrico (SIG's), um modelo tridimensional das seções foi criado para melhor entendimento dos estratos geoeétricos na região do aterro compactado, e como já citado anteriormente, as seções SIG L7, SIG L2 e SIG L9 apresentam variação de resistividade muito bruscas e com aparentes falhas geológicas.

Na Figura 5-27, circulados em vermelho, a variação de resistividade é evidenciada, onde as áreas com cores mais quentes (marrom escuro) apresentaram, segundo a escala cromática (Figura 5-5), valores de alta resistividade entre 50.000 a 100.000 Ohm.m, enquanto em seus

entornos variando em profundidades diversas, áreas com baixos valores (entre 25 a 500 Ohm.m).

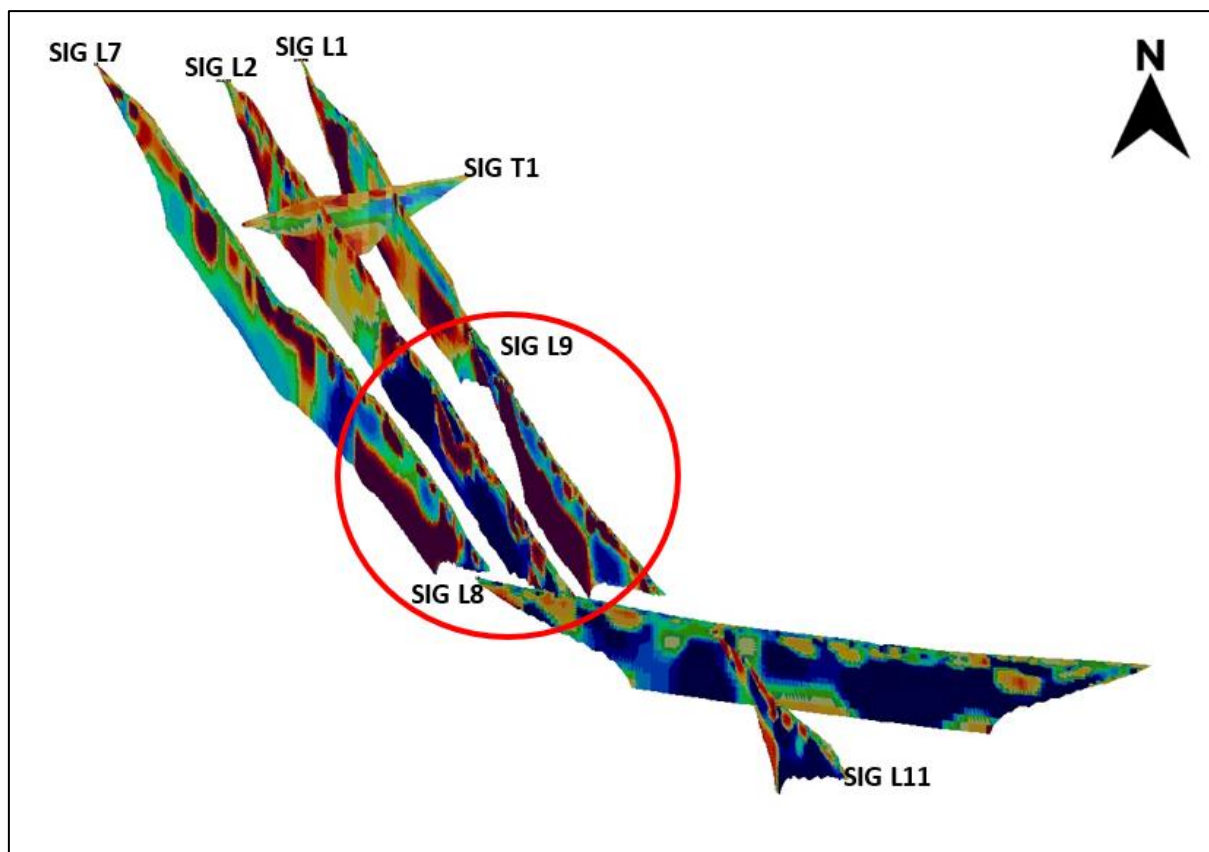


Figura 5-27: Modelo tridimensional das seções criado para melhor entendimento dos estratos geoeletricos na região do aterro compactado. Fonte: Autor (2025).

Foi feita uma análise dos dados apresentados no modelo tridimensional e comparando esses dados com os dois pontos de mapeamento de fraturas na região mais a leste do CACA, no anel de quartzito, pôde-se observar uma família preferencial de fraturas que apresenta uma direção NNE-SSW e outras três famílias secundárias (ENE-WSW no Ponto 1 e no Ponto 2, NNW-SSE e NNE-SSW). A Figura 5-28 mostra o local de estudo com as seções de imageamento geoeletricos e os dois pontos mapeados com seus respectivos diagramas de rosetas representando as direções das fraturas.

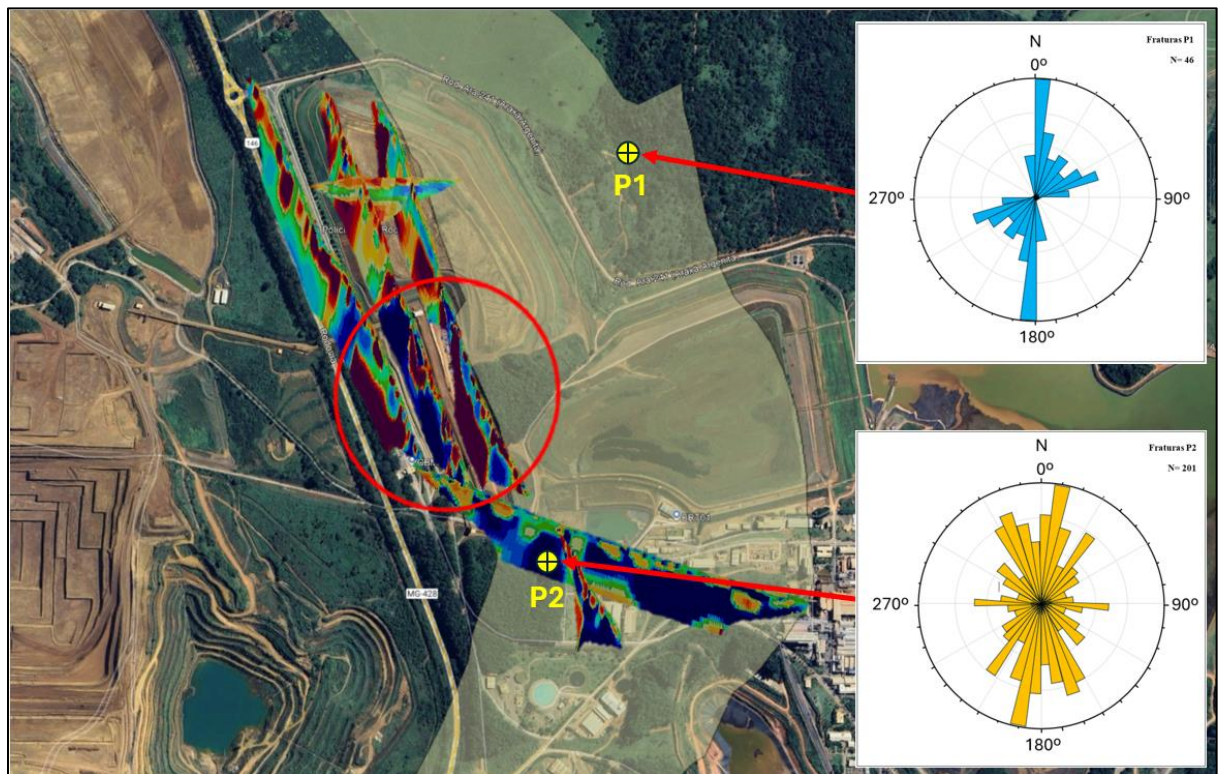


Figura 5-28: Local de estudo com a interpolação das seções de imageamento geolétricos, em 3D e os dois pontos de mapeamento de fraturas com seus respectivos diagramas de rosetas. Fonte: Autor (2025).

A Figura 5-29 mostra uma trincheira com exposição do anel de quartzitos fenitizados, exemplificando um dos pontos de mapeamento das fraturas (ponto 2).



Figura 5-29: Exposição do anel de quartzitos fenitizados mapeado no ponto 2. a) quartzitos sotopostos a camada de solo; b) fraturamento do quartzito. Fonte: Relatório interno (2020).

Foi feita também uma projeção dos planos das principais famílias de fraturas no modelo 3D das SIG's, para melhor visualização e interpretação dessa interpolação. A Figura 5-30 mostra essa projeção das famílias de fraturas com seus azimutes, cruzando o ponto central da área de menor resistividade (local de recalque). Planos de fraturas em azul, referentes ao ponto de mapeamento 1 e planos de fraturas em laranja, referentes ao ponto de mapeamento 2.

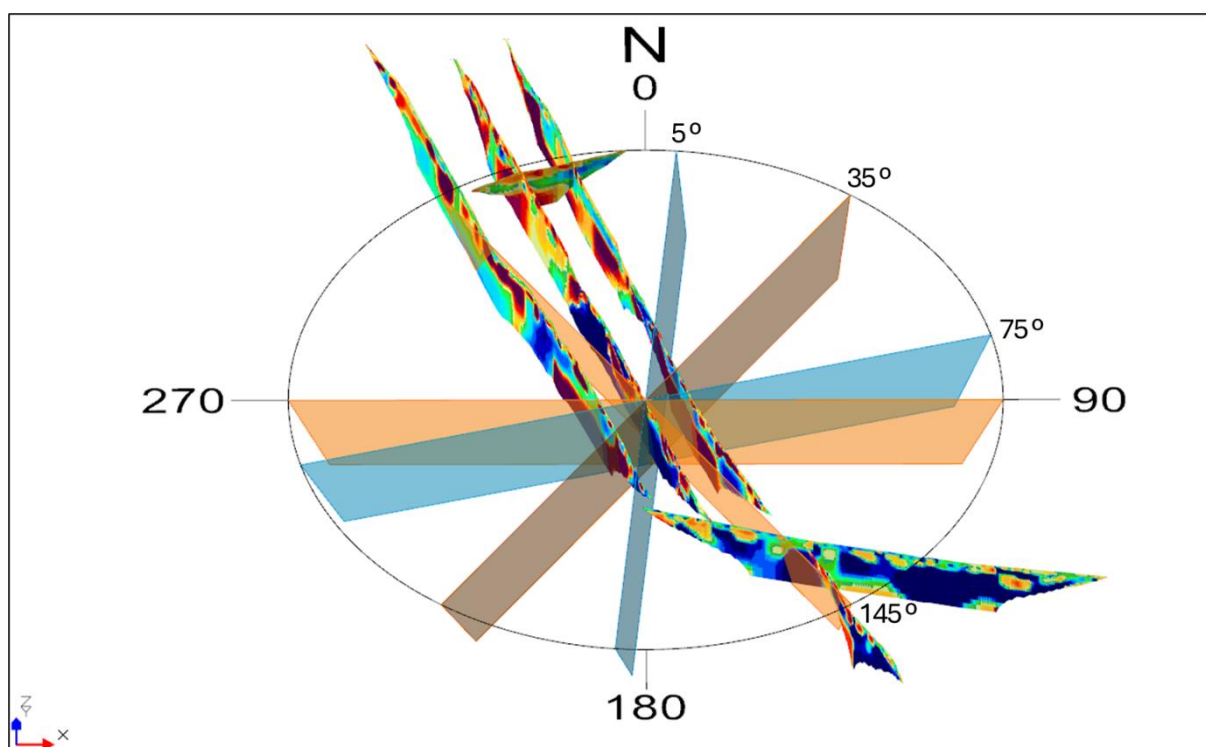


Figura 5-30: Vista geral em perspectiva da projeção das principais famílias de fraturas nas seções de imageamento geoeletricos, em 3D. Fonte: Autor (2025).

Os planos de fraturas foram analisados individualmente e projetados nas estruturas interpretadas como falhas e substratos de baixa resistividade, nos perfis do imageamento geofísico. As famílias das principais fraturas, com azimuth de 5°, mapeadas tanto no ponto 1 quanto no ponto 2, indicam uma convergência com estruturas do imageamento onde há fortes indícios de zonas com baixa resistividade e/ou percolação de fluidos.

Nas próximas figuras (Figura 5-31 e Figura 5-32), evidencia-se os detalhes das convergências entre os planos das fraturas com azimuth de 5°, distribuídas respeitando um paralelismo entre elas a fim de verificar as convergências com as estruturas.

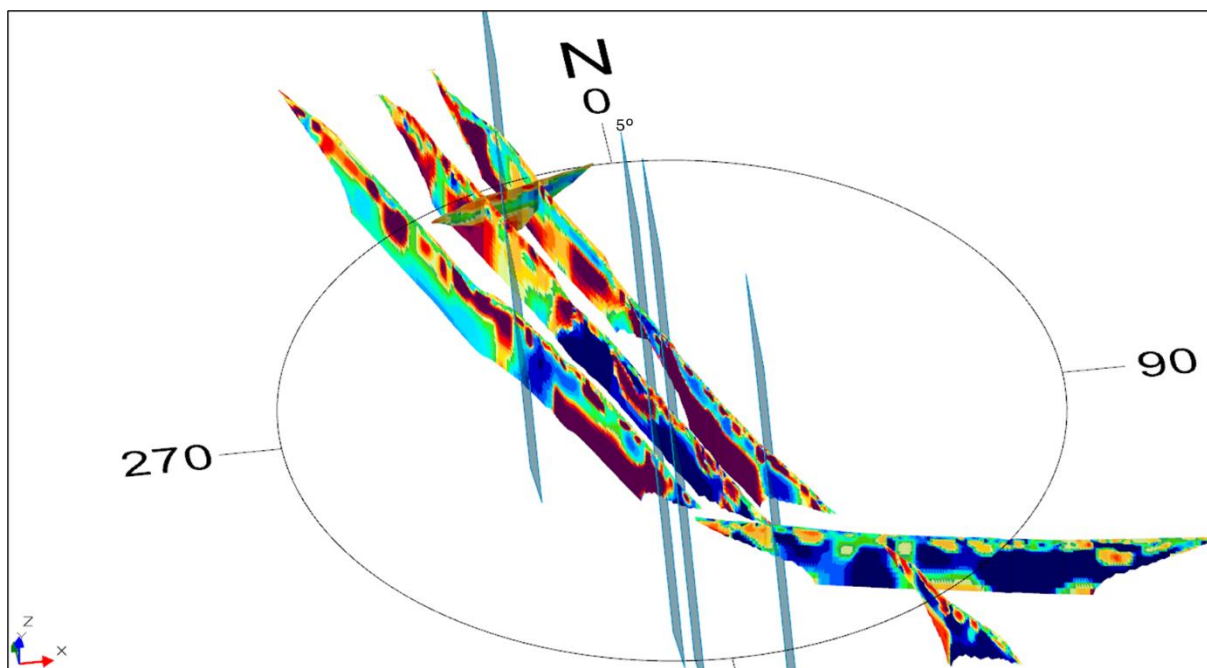


Figura 5-31: Família das fraturas principais, com azimuth de 5°, mapeadas nos pontos de 1 e 2, projetadas no modelo de imageamento geoeletrico. Fonte: Autor (2025).

A Figura 5-32 a seguir é uma aproximação da Figura 5-31 no local do estudo que mostra que a direção dos planos de fraturas coincidem com extratos de baixas resistividade e/ou com interseção de zonas de altas com baixas resistividades. Na região do alinhamento SIG L9, próximo da progressiva 480 (conforme citado na Figura 5-12), destacada com o retângulo vermelho, que tem uma assinatura típica de uma estrutura de falhamento, mostra que o plano de fratura está coincidindo com esse plano subverticalizado.

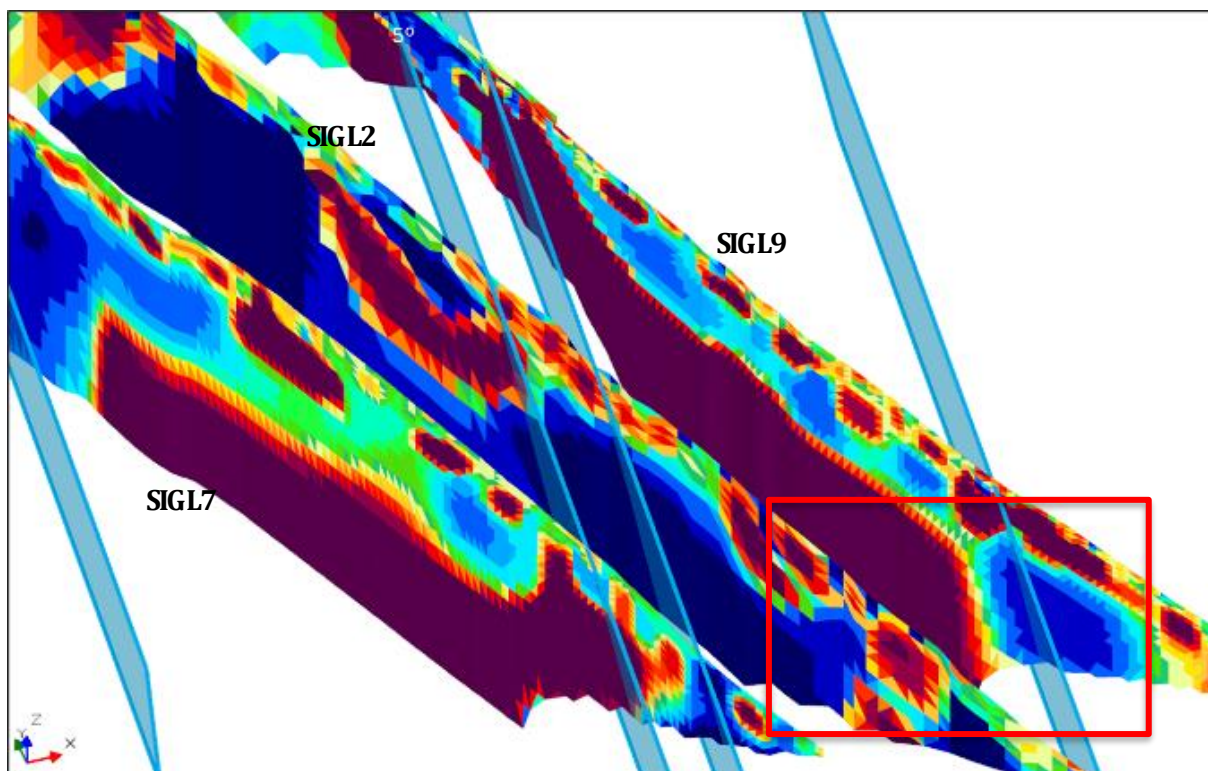


Figura 5-32: Planos de fraturas com azimuth de 5°, mapeadas nos pontos 1 e 2, distribuídos na área de estudo, convergentes com estruturas das Seções Geolétricas. Fonte: Autor (2025).

Nas figuras a seguir, os planos das famílias secundárias, com azimutes de 35°, 75°, 90° e 145°, mapeadas nos pontos 1 e 2, foram interpretadas como convergentes com estruturas do imageamento.

A Figura 5-33 evidencia planos de fraturas com azimuth de 35°, projetados no local do estudo que também têm convergência com as estruturas de estratos de baixa resistividade que indicam percolação de fluidos e que também cortam perpendicularmente zonas de falhas subverticalizadas.

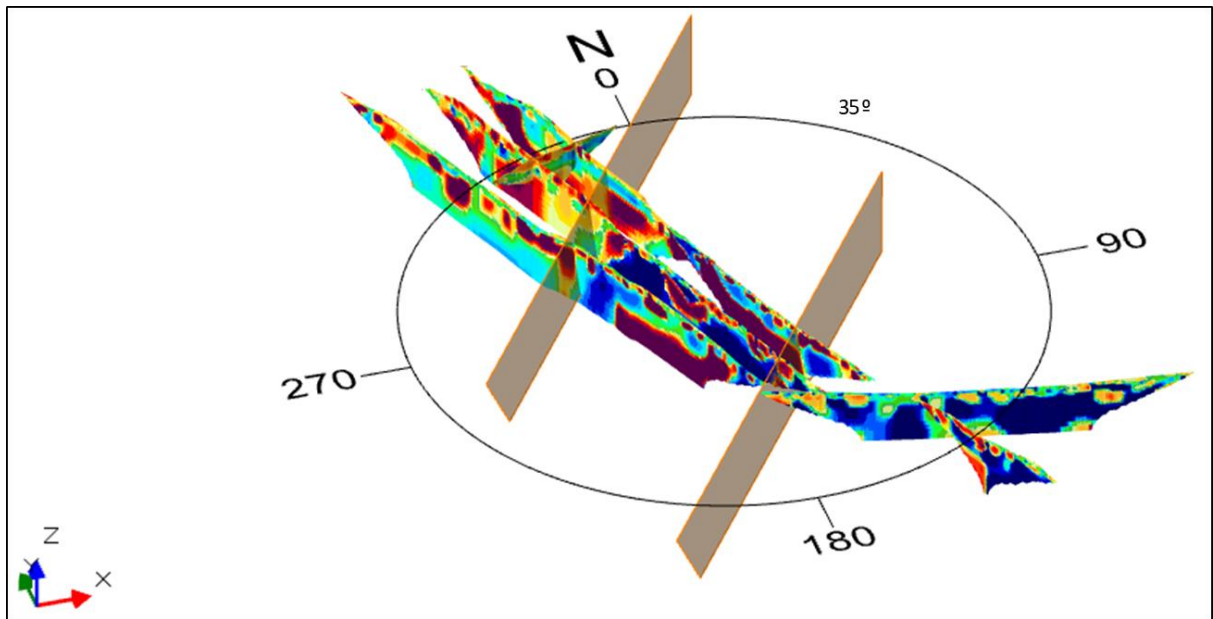


Figura 5-33: Famílias de fraturas secundárias, com azimuth de 35°, mapeadas no ponto 1 e 2, projetadas no modelo. Fonte: Autor (2025).

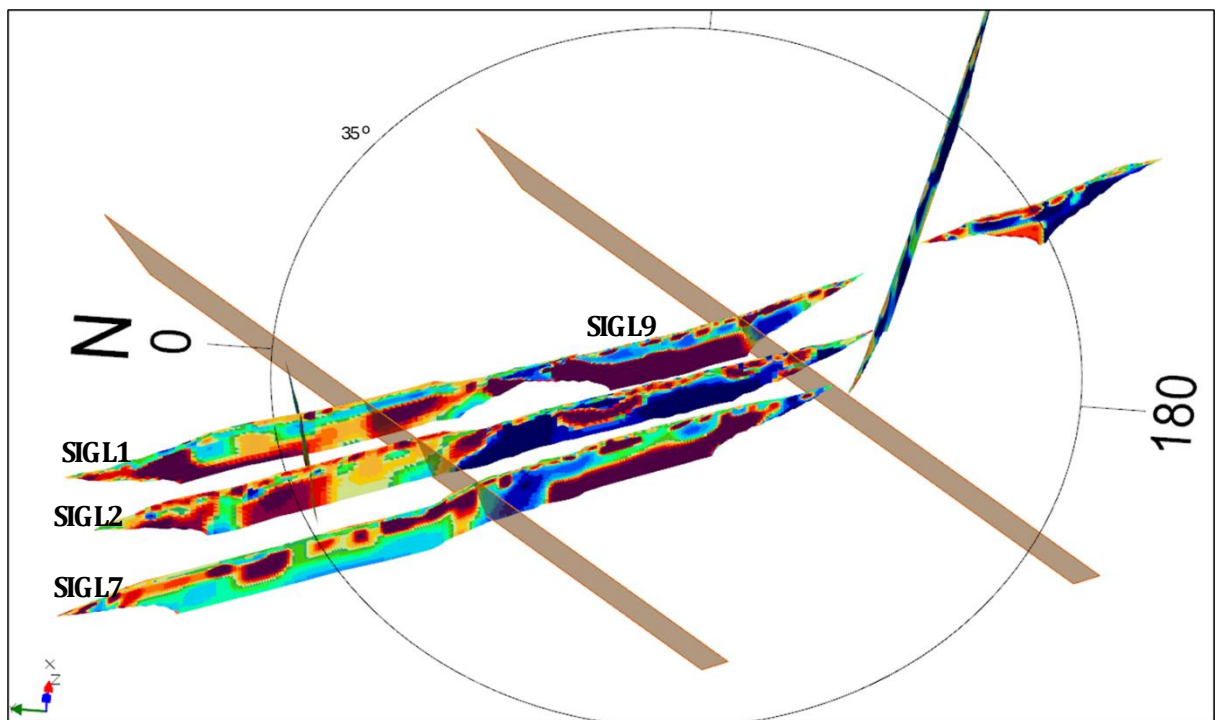


Figura 5-34: Famílias de fraturas secundárias, com azimuth de 35°, em outra perspectiva, em que os dois planos cortam perpendicularmente zonas de falhas subverticalizadas na SIG L1, SIG L7 e SIG L9. Fonte: Autor (2025).

Na Figura 5-35, Figura 5-37 (azimute 75°), Figura 5-36 e Figura 5-38 (azimute 90°), há uma direção dos planos que convergem para o sentido de fluxos de fluidos, assim como em figuras anteriores.

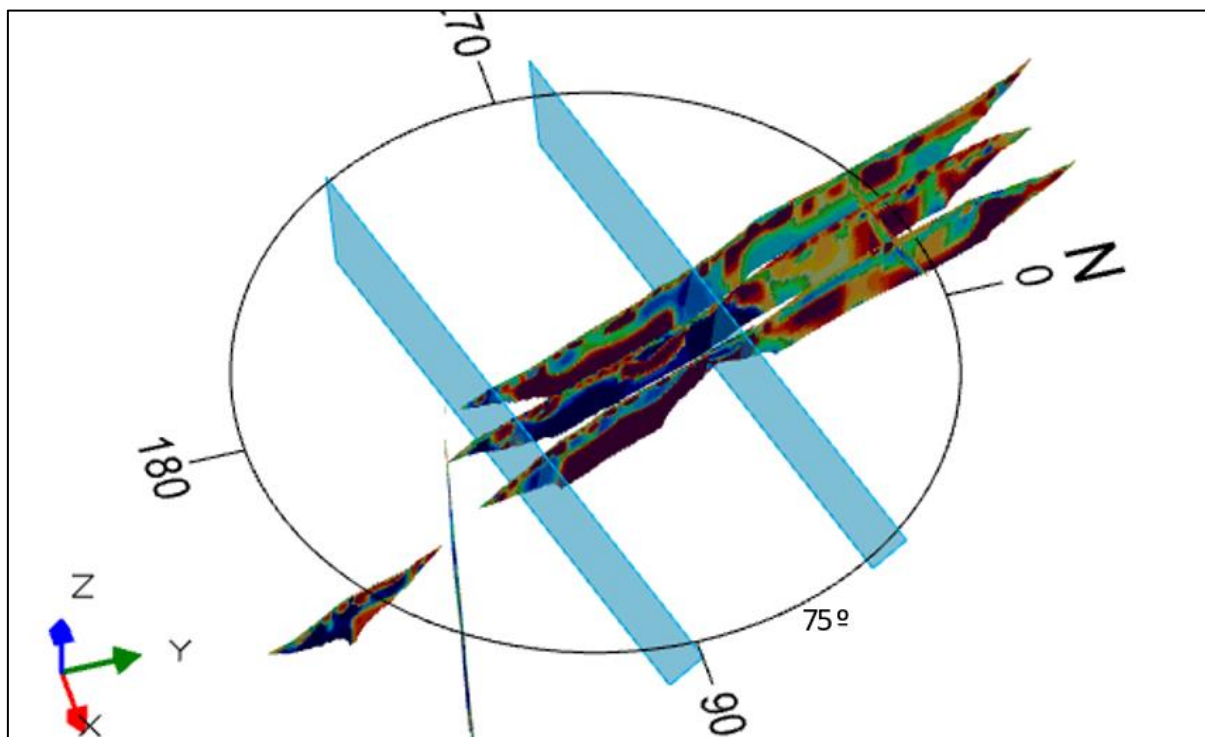


Figura 5-35: Família de fraturas secundárias, com azimute de 75° , mapeadas no ponto 1 e projetadas no modelo de imageamento geolétrico, evidenciando que suas direções coincidem com fluxos de fluidos detectados no modelo. Fonte: Autor (2025).

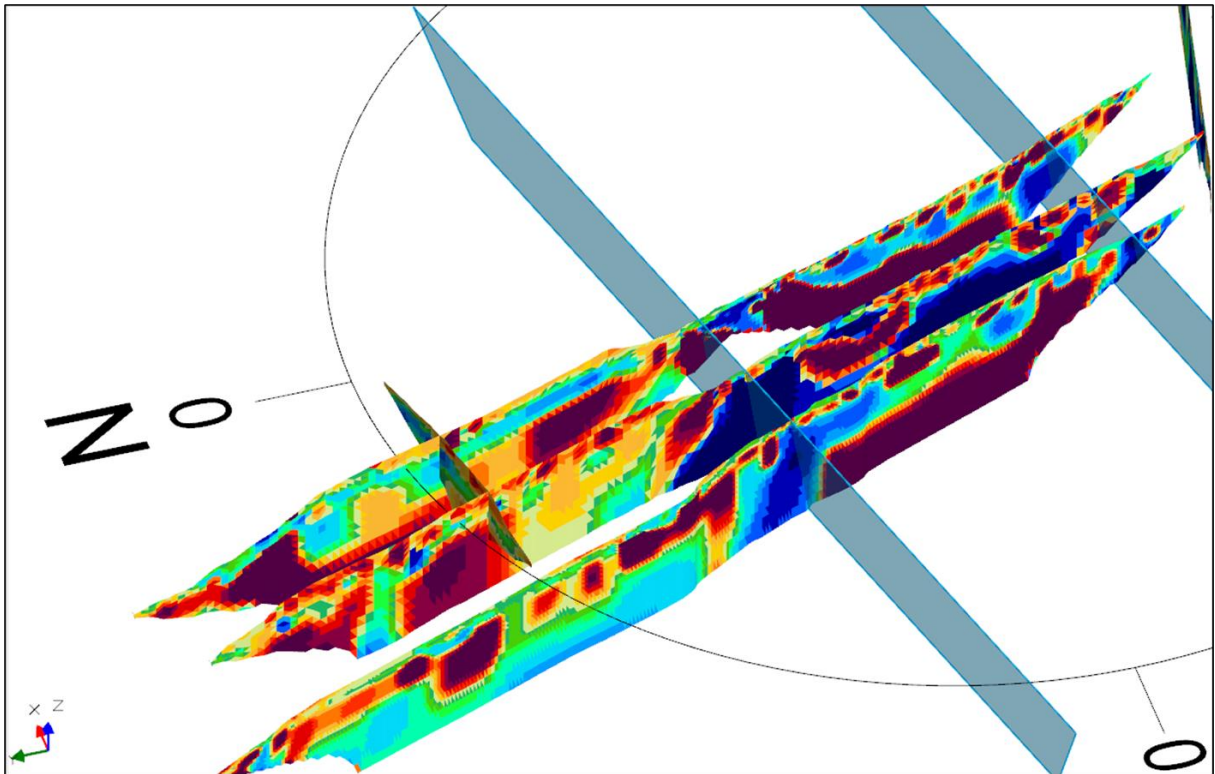


Figura 5-37: Família de fraturas secundárias em perspectiva diferente da figura anterior, com azimuth de 75° , mapeadas no ponto 1 e 2, projetadas no modelo de imageamento geolétrico. Fonte: Autor (2025).

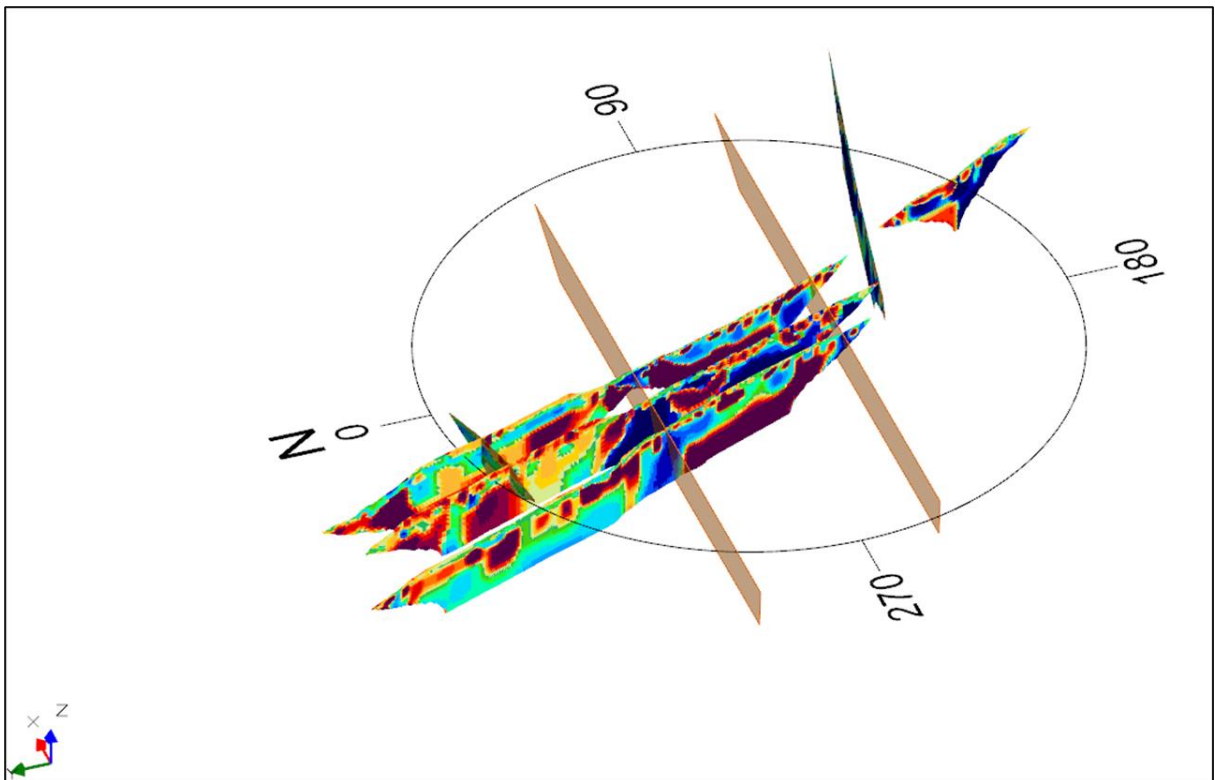


Figura 5-36: Família de fraturas secundárias, com azimuth de 90° , mapeadas no ponto 1 e 2, projetadas no modelo de imageamento geolétrico, evidenciando que suas direções coincidem com fluxos de fluidos detectados no modelo. Fonte: Autor (2025).

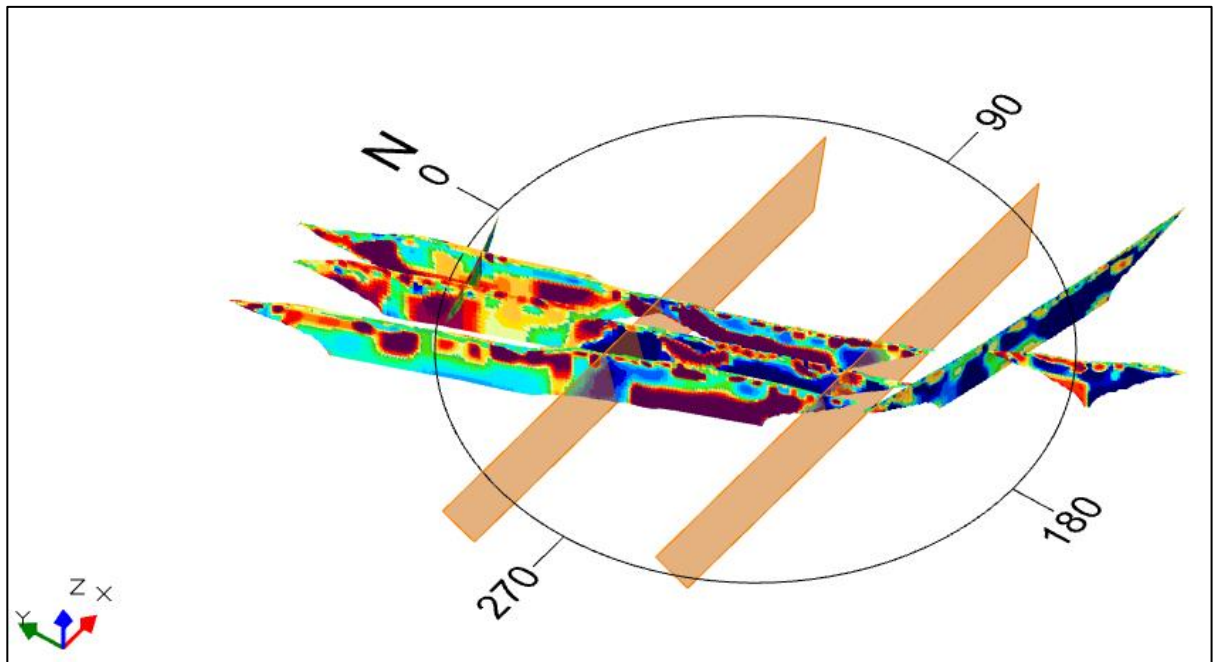


Figura 5-38: Família de fraturas secundárias em perspectiva diferente da Figura 5-36, com azimuth de 90° , mapeadas no ponto 1 e 2, projetadas no modelo de imageamento geoeletrico. Fonte: Autor (2025).

Nas duas próximas figuras (Figura 5-40 e Figura 5-39), com azimuth 135° há evidência de um plano de uma importante família de fraturas que cruzam áreas com estratos de baixas resistividade. Na SIG L8, que embora esteja fora da área do estudo, mas que está nas adjacências dela, esse plano coincide com várias áreas em azul de baixas resistividade, como já dito anteriormente, respeitando um paralelismo entre planos.

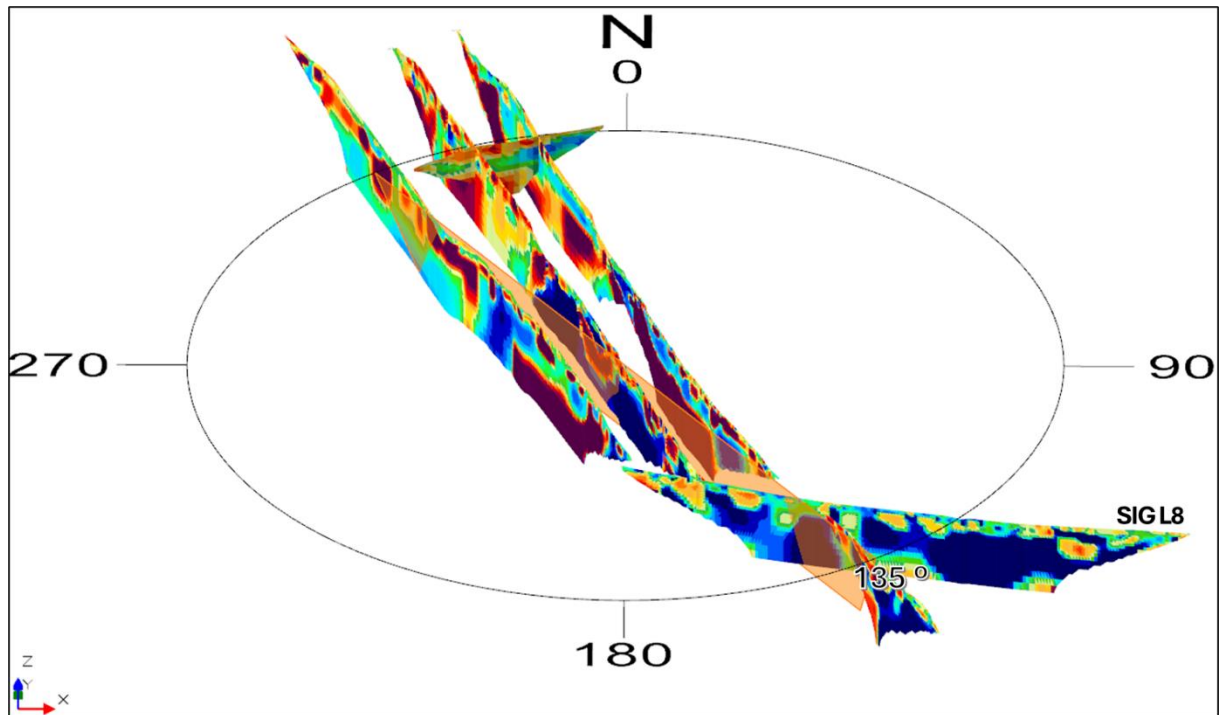


Figura 5-40: Plano de família de fraturas secundárias, com azimuth de 135° , mapeadas no ponto 2, projetadas no modelo de imageamento geoeletrico, evidenciando que suas direções coincidem com fluxos de fluidos detectados no modelo. Fonte: Autor (2025).

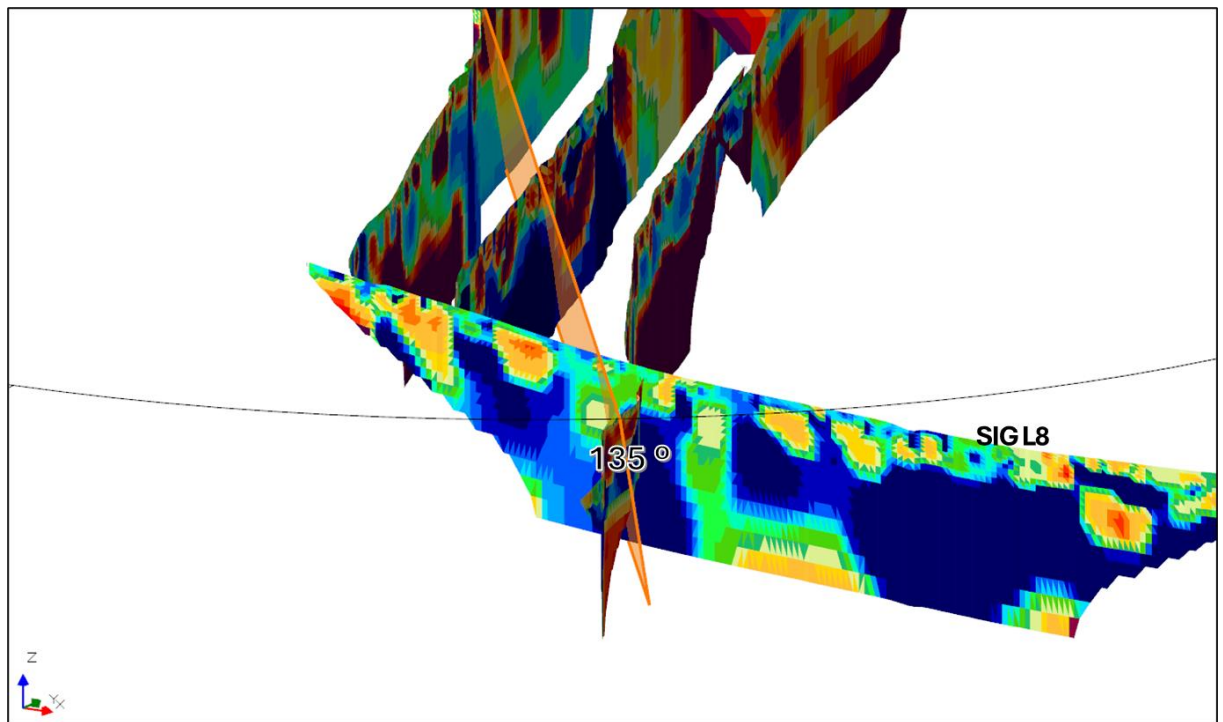


Figura 5-39: Plano de família de fraturas secundárias em perspectiva diferente da figura anterior, com azimuth de 135° , mapeadas no ponto 2, projetadas no modelo de imageamento geoeletrico. Fonte: Autor (2025).

Concluiu-se então, que perante as direções de fraturas mapeadas e aqui expostas, todas as suas direções contribuem para que a região do estudo seja uma área com substratos muito fraturados e que associados com evidências de baixas resistividade, têm grandes fluxos de fluidos e em várias direções.

Diante dos dados apresentados, contemplando a geologia local com seus parâmetros de resistência, o estudo geofísico e as estruturas das fraturas no anel de quartzito que circunda a área, há indícios de correlação entre eles que corroboram com o problema-questão desse trabalho (recalque) em que os substratos da área de estudo apresentam condições e características suscetíveis a acomodações e movimentações por falhas, fraturas, materiais argilosos saturados em água, tanto nas camadas superiores como nas mais profundas.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho explorou a aplicação do método de eletrorresistividade no imageamento geológico, evidenciando suas diversas aplicações, vantagens, limitações e os avanços tecnológicos. A eletrorresistividade se destacou como uma técnica essencial na caracterização da subsuperfície, proporcionando informações detalhadas sobre a composição e distribuição dos materiais geológicos sem a necessidade de intervenções invasivas.

A revisão bibliográfica revelou que a eletrorresistividade é amplamente utilizada em várias áreas, como hidrogeologia, geotecnia, mineração e estudos ambientais. Na mineração, que foi o caso desse estudo, a técnica auxilia na identificação de corpos mineralizados e estruturas geológicas associadas, aumentando a eficiência das operações de prospecção e estabilização de maciços.

Os avanços tecnológicos, como o desenvolvimento de equipamentos portáteis e robustos, a integração com sistemas de GPS e a modelagem tridimensional, têm ampliado significativamente as aplicações do método de eletrorresistividade. A combinação com outras técnicas geofísicas, como a tomografia elétrica, tem melhorado a resolução espacial das investigações, proporcionando uma visão completa das características geológicas. No entanto, a técnica também apresenta algumas limitações, como a influência de ruídos naturais e artificiais, a resolução limitada em profundidades maiores e as dificuldades em terrenos altamente resistivos ou condutivos. A mitigação dessas limitações envolve o uso de equipamentos modernos, a combinação com outras técnicas geofísicas e a aplicação de técnicas de inversão avançadas na modelagem de dados de resistividade.

A integração de técnicas como a análise sísmica MASW também se mostrou promissora para melhorar a caracterização geotécnica da subsuperfície, uma vez que estratos com maior resistividade, como rocha sã, não foram encontrados assim como no método de eletrorresistividade.

Os resultados desse estudo de caso, conforme o problema-questão, o histórico do recalque e informações de estudos do solo antes da construção do aterro e após o estudo geofísico, através do método de levantamento sísmico e, principalmente, o de eletrorresistividade trouxe interpretações conexas aos trabalhos de campo, com as análises e

comparações dos dados e resultados de campo, em que a região do Pátio de Homogeneização onde situa-se o aterro, apresenta substratos de rocha com alto índice de percolação de fluidos evidenciado na Seção de Imageamento Geométrico – SIG L9, entre as progressivas 40 e 580 e entre as cotas 1150 e 1100. Já na SIG L2 que está paralela à L9 essa área situa-se entre as progressivas 1400 e abaixo da 1090 (não mostrado até o limite de alcance da SIG).

Concluiu-se, portanto, que essa área de maior percolação de fluidos e consequentemente interpretada como área de menor resistividade do solo associada aos estudos de SPT, contribuiu para um maior recalque além do esperado na região do aterro, e que somente os estudos superficiais, mesmo que invasivos, mas de menor alcance como o STP, não permitiram identificar acomodações dos substratos mais profundos.

Nas seções de imageamento geométrico pôde-se observar nas áreas da região do aterro uma similaridade de estratos, com destaque para a SIG L9, onde fica evidente uma possível falha na progressiva 480 m e que a área de menor resistividade entre as progressivas 480 m e 580 m se aprofunda abaixo da cota 1090 m, podendo ser uma região de maior possibilidade de acomodação, associada à região de rochas do anel de quartzito, muito fraturadas, conforme análise no item 5.4 e também ao solo argiloso da superfície, destacado no item 3.9.1, que por suas características litológicas ainda podem se acomodar quando submetidas a pressões de construções, pilhas de minério e movimento de máquinas pesadas.

6.1. Considerações finais e recomendações

O método geofísico por Eletroresistividade foi aplicado na área do Pátio de Homogeneização com o intuito de fornecer subsídio aos estudos geotécnicos, delimitando áreas com maior potencial para percolação de fluidos e caminhos preferenciais de fluxos, através do mapeamento contínuo da subsuperfície em termos das resistividades elétricas e correlacionando-se os valores obtidos a locais com maior faturamento da rocha e maior ou menor concentração de água.

6.1.1. Sugestões de futuras Pesquisas:

- a. Realização da descrição dos furos de sondas que se encontram próximos da área do Pátio de Homogeneização, uma vez que eles não foram descritos até a data de término desse trabalho;
- b. Realização de um estudo mais aprofundado e direto do aterro do pátio;
- c. Por fim, sugere-se uma análise dos dados e resultados apresentados nesse trabalho para as tomadas de decisões de correções dos problemas de desnível dos trilhos das máquinas de pátio e para as futuras ampliações do Pátio de Homogeneização, que já estão em curso a fim de, se necessário, mudar o método construtivos das bases civis dos trilhos e edificações diversas no local.

Vale lembrar que, coincidentemente, a área onde a maioria as futuras instalações de ampliação estão previstas estão fora da zona de menor resistividade, que compreende a região mais a NWE fora da área onde está o aterro.

7. REFERÊNCIAS

ASPINALL, Adrian; GAFFNEY, Chris; SCHMIDT, Armin. **Magnetometry for Archaeologists**. Altamira Press, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR-6484 – **Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR-8036 – **Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações**, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT); NBR-6122 – **Projeto e Execução de Fundações**, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT); NBR-6497 – **Levantamento Geotécnico**, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT); NBR-6502 – **Rochas e Solos**, 1995

BENSON, Allen Kenneth; PAYNE, Karen Lynn; STUBBEN, Mark Arthur. **Mapping groundwater contamination using DC resistivity and VLF geophysical methods: A case study**. Geophysics, v. 62, n. 1, p. 80-86, 1997.

BIONDI, J. C., **Processos Metelogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003,

BORTOLIN, José Ricardo Melges; MALAGUTTI FILHO, Walter. Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, p. 367-374, 2010.

BURGER, H. Robert; SHEEHAN, Anne F.; JONES, Craig H. Introduction to applied geophysics: Exploring the shallow subsurface. **Cambridge University Press**, 2023.

BURGER, H. Robert; SHEEHAN, Anne F.; JONES, Craig H. Introduction to Applied CLARK, Anthony. Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology. **Batsford**, 1996.

FROHLICH, Reinhard K.; HAENNINEN, Paavo E.; PURANEN, Reijo J. **Use of geophysical methods for the assessment of groundwater contamination in glacial till.** Hydrogeology Journal, v. 2, n. 3, p. 26-35, 1994.

GOMES, T. A. T. **Caracterização Hidrogeológica e Simulação Numérica da Jazida de Pirocloro, Associada ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, Araxá – Mg,** Campinas, 2017.

GOMES, T. A. T. **Faturas e falhas como possíveis condicionantes estruturais no fluxo de águas subterrâneas no Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, Araxá - MG,** Estudo dirigido, Campinas, 2020.

GRIFFITHS, David H.; BARKER, R. David. **Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology.** Journal of Applied Geophysics, v. 29, n. 3-4, p. 211-226, 1993.

GRIFFITHS, David H.; TURNBULL, John. **A multi-electrode array for resistivity surveying.** First Break, v. 3, n. 7, p. 16-20, 1985.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **An Introduction to Geophysical Exploration.** Wiley-Blackwell, 2002.

KOEFOD, Ole. **Geosounding Principles 1: Resistivity Sounding Measurements.** Elsevier, 1979.

LIMA, T. M. R. **Estudo Paramétrico de Otimização de Geometria e Setorização da Cava em uma Mina de Nióbio em Araxá-Mg,** Araxá, 2024.

LOKE, Meng Heng. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. **Geotomo Software,** 2004.

MACHADO, Rodrigo **Aplicação do Método Eletroresistivo Em Ambiente Aquático Para o Mapeamento do Subfundo do Rio São Francisco,** 2008.

MARCHIORETO, A. **Implementação, Testes e Avaliação do Método SASW (Spectral Analysis of Surface Waves),** São Paulo, 2002.

MCNEILL, John Donald. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In: WARD, Stanley H. (Ed.). **Geotechnical and Environmental Geophysics.** v. 1. Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 191-218.

MORAES, L. C., SEER, H. J., BENTO, J. H. B., LEAL, C. F., MADEIRA, M. R. **Análises Geométrica do Alojamento de Magmas no Entorno do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, Araxá, Minas Gerais, por meio da Atitude Espacial de Fraturas e Diques.** In: IV Simpósio de vulcanismo e ambientes associados, Foz do Iguaçu, PR, 2008.

NAZARIAN, S.; STOKOE II, K. H.; HUDSON, W. R. **Use of Spectral Analysis of Surface Waves Method for Determination of Moduli and Thicknesses of Pavement Systems.** Transportations Research Record 930, 1983.

NIELSEN, David Michael (Ed.). **Practical Handbook of Ground-Water Monitoring.** CRC Press, 1991.

OLIVEIRA, A. M. dos S. Brito, S. N. A. **de Geologia de Engenharia.** São Paulo: Oficina de Textos, 1998. 586 p.

ORELLANA, **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua.** Madrid: Paraninfo, 1972.

PALACKY, Gerard J. **Resistivity characteristics of geologic targets.** In: NABIGHIAN, Misac N. (Ed.). **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 1, Theory.** Society of Exploration Geophysicists, 1988.

PARASNIS, Danesh S. **Principles of Applied Geophysics.** Chapman & Hall, 1997.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO – **Fraturas e Falhas como Possíveis Condicionantes Estruturais no Fluxo de Águas Subterrâneas no Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, Araxá,** 2020.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO – **Levantamento Geofísico pelo Método Eletorresistivo (Imageamento Geolétrico) Subsídio aos Estudos Geológicos e Hidrogeológicos na Área da Pilha de Estéril e Arredores,** 2021.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO – **Levantamento para Definição de Direção Preferencial de Estruturas Rúpteis,** 2022.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-254/10,** 2010.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-0125/11,** 2011.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-044/11**, 2011.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-164/11**, 2011.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-182/11**, 2011.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-210/11**, 2011.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-239/11**, 2011.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-258/11**, 2011.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-317/11**, 2011.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-026/12**, 2012.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-059/12**, 2012.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-110/12**, 2012.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-221/12**, 2012.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-250/12**, 2012.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Instrumentação de Acompanhamento de Aterro - RIS-SP-321/12**, 2012.

RELATÓRIO TÉCNICO INTERNO. **Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT - R004/23**, 2023.

REYNOLDS, John M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. Wiley-Blackwell, 2011.

RICHART, F. E., HALL, J. R., WOODS, R. D. **Vibrations of soils and Foundations**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1970.

SEER, H.J. **Evolução tectônica dos Grupos Araxá e Ibiá na Sinforma de Araxá, MG**. Universidade de Brasília - Instituto de Geociências. Brasília, 1999.

SILVA, A. B. M., MARCHETTO, M., & SOUZA, O. M. **Geologia do Complexo Carbonatítico de Araxá (Barreiro)**, Minas Gerais. Mineração e Metalurgia, 1979.

STROBBIA, C., **Surface Wave Method. Acquisition, Processing and Inversion**, PhD Thesis, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2003.

TELFORD, William Murray; GELDART, Lloyd P.; SHERIFF, Robert E. **Applied geophysics**. Cambridge University Press, 1990.

WARD, Stanley H. (Ed.). **Geotechnical and Environmental Geophysics**. Society of Exploration Geophysicists, 1990.

ZOHDY, Abdelfattah A. R.; EATON, Gordon P.; MABEY, Donal R. **Application of Surface Geophysics to Ground-Water Investigations**. US Government Printing Office, 1974.