



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SETORIZAÇÃO HIDROGEOTÉCNICA EM UMA MINA DE FOSFATO

EWERTON APARECIDO RODRIGUES

ARAXÁ-MG
2024

EWERTON APARECIDO RODRIGUES

SETORIZAÇÃO HIDROGEOTÉCNICA EM UMA MINA DE FOSFATO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do CEFET-MG, na área de concentração de Geologia de Engenharia na Mineração, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer.

Araxá
2024

R696s	Rodrigues, Ewerton Aparecido. Setorização hidrogeotécnica em uma mina de fosfato / Ewerton Aparecido Rodrigues. – 2024. 102 f. : il. Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer. Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2024. Bibliografia. 1. Minas e Mineração – Teses. 2. Geotecnia – Teses. 3. Mapeamento estrutural – Teses. 4. Jazidas de fosfato – Teses. I. Seer, Hildor José. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título. CDU 622.2
-------	--

EWERTON APARECIDO RODRIGUES

SETORIZAÇÃO HIDROGEOTÉCNICA EM UMA MINA DE FOSFATO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais — CEFET-MG, Campus Araxá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Aprovada em 22/10/2024 pela seguinte comissão examinadora

Prof. Dr. Hildor José Seer
(Orientador) – PPGEMIN/CEFET-MG

Profª. Me. Silvânia Alves Braga de Castro
(Membro externo) – CEFET-MG

Geólogo Me. Tiago Antônio Torres Gomes
(Membro externo) CBMM

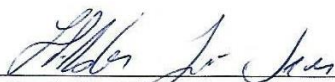
ARAXÁ-MG

2024

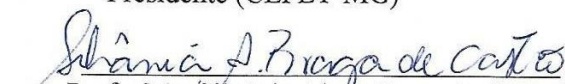
ATA DA 39ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

Aos 22 (vinte e dois) dias do mês de outubro do ano de 2024 (dois mil e vinte e quatro), às 19h00 h (dezenove horas), *sob a forma presencial*, na sala de aula do prédio do Mestrado em Engenharia de Minas, localizada no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Araxá, foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação do Mestrando Ewerton Aparecido Rodrigues, sendo a banca examinadora composta pelo Geólogo Prof. Dr. Hildor José Seer (Presidente) – CEFET-MG, Geólogo Me. Tiago Antônio Torres Gomes da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (Membro externo) e Geóloga Profa. Me. Silvânia Alves Braga de Castro (Membro externo) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. 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 Ewerton Aparecido Rodrigues, até 40 (quarenta) minutos para a apresentação do seu trabalho intitulado “SETORIZAÇÃO HIDROGEOTÉCNICA EM UMA MINA DE FOSFATO”, 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 (aprovado/reprovado/aprovado com recomendações) por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo Mestrando.

Araxá, 22 de outubro de 2024.



Prof. Dr. Hildor José Seer
Presidente (CEFET-MG)



Prof. Me. Silvânia Alves Braga de Castro
Membro externo (CEFET-MG)



Geólogo Me. Tiago Antônio Torres
Gomes Membro externo (CBMM)



Engº Ewerton Aparecido Rodrigues
Discente

*“Diante da vastidão do tempo e da
imensidão do universo, é um
imenso prazer para mim dividir
um planeta
e uma época com você.”
Carl Sagan*

RESUMO

A área de estudo localiza-se à sudeste da cidade de Patrocínio, e está inserida no Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre I, que possui depósitos de fosfato de origem magmática com enriquecimento supergênico. Este trabalho teve como objetivo compilar e interpretar as possíveis estruturas rúpteis no manto de intemperismo e zonas que possam influenciar na estabilidade dos taludes da mina, tendo como produto final o mapa de setorização hidrogeotécnica da cava. Por meio das vazões dos poços de rebaixamento, avaliação preliminar das estruturas e o conhecimento da geologia local, observou-se que as direções de alta vazão NE-SW estão associados à direção do córrego do Bebedouro. Na região onde há aumento da espessura do manto de intemperismo (aproximadamente 245 m), foi interpretada uma possível falha e os poços de rebaixamento possuem baixa vazão. Os levantamentos geofísicos associados aos dados de espessura do manto de intemperismo (modelo geológico), descrição geológica-geotécnica dos furos de implantação dos poços de rebaixamento e suas respectivas vazões, permitiram a correlação com o mapeamento de campo. Possíveis falhas interpretadas em estudos anteriores e lineamentos/conduitos preferenciais de alta percolação em meio ao manto saprolítico. O conjunto de dados possibilitou a elaboração de um mapa de setorização hidrogeotécnica. Este produto propiciará o desenvolvimento de planos de lavra seguros, promovendo o melhor aproveitamento econômico do depósito mineral.

Palavras-chave: mapeamento estrutural, horizontes de intemperismo, dados geofísicos, dados hidrogeológicos, risco geotécnico, mapa hidrogeotécnico.

ABSTRACT

The study area is located to the southeast of the city of Patrocínio and is part of the Salitre I Alkaline-Carbonatite Complex, which has phosphate deposits of magmatic origin with supergene enrichment. The aim of this work was to compile and interpret the possible rupile structures in the weathering mantle and zones that could influence the stability of the mine's slopes, with the final product being the hydrogeotechnical sectorization map of the pit. Through the flow rates of the sinkholes, preliminary assessment of the structures and knowledge of the local geology, it was observed that the directions of high flow NE-SW are associated with the direction of the Bebedouro stream. In the region where there is an increase in the thickness of the weathering mantle (approximately 245 m), a possible fault was interpreted, and the downgradient wells have low flow rates. The geophysical surveys associated with the data on the thickness of the weathering mantle (geological model), the geological-geotechnical description of the boreholes where the sinkholes were drilled and their respective flow rates, allow for correlation with the field mapping. Possible faults interpreted in previous studies and preferential lineaments/conduits of high percolation in the saprolitic mantle. This set of data made it possible to draw up a hydrogeotechnical sectorization map. This product will enable the development of safe mining plans, promoting the best economic use of the mineral deposit.

Keywords: structural mapping, weathering horizons, geophysical data, hydrogeological data, geotechnical risk, hydro-geotechnical map.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de Patrocínio/MG e da região do Salitre I (Área de estudo).	15
Figura 2– Mapa de localização das cavas.	17
Figura 3 - Estereograma e diagrama de Roseta da Cava Leste. Valores médios de Mergulho e Direção do Mergulho.	18
Figura 4 - Estereograma e diagrama de Roseta da Cava Sul. Valores médios de Mergulho e Direção do Mergulho.	18
Figura 5 - Estereogramas em suas respectivas regiões na Cava Sul.	19
Figura 6 - Estereograma e diagrama de Roseta das Regiões delimitadas na Cava Sul. Valores médios de Mergulho e Direção do Mergulho.	20
Figura 7	22
Figura 8-	23
Figura 9 - Detalhes dos exemplos de RQD e Grau de Fraturamento dos testemunhos de sondagens das rochas carbonatíticas da mina.	24
Figura 10 - Pontos do levantamento geofísico realizados em campo (Cava Norte e Sul).	26
Figura 11 - Imagem do filtro do sinal analítico sem a aplicação de filtros mostrando as regiões com maior intensidade magnética na área.	27
Figura 12 - Imagem do filtro do sinal analítico filtrada, onde fica mais evidente uma estruturação nas anomalias de direção NW-SE	28
Figura 13 - Imagem da derivada vertical (dZ) que mostra uma forte estruturação das anomalias no eixo Z na direção NW-SE.	29
Figura 14 - Vistas panorâmica (a) e de mapa (b) do local de Canyet mostrando a posição do equipamento geofísico.	32
Figura 15 - Resultados dos levantamentos geofísicos realizados no afloramento de Canyet. Nas formações de afloramento, o campo de velocidade da onda P é fortemente assimétrico em relação à falha principal, enquanto a velocidade da onda P e a resistividade elétrica exibem uma distribuição significativamente mais simétrica em profundidade.	32
Figura 16 - Falhas normal (A), transcorrente (sinistral) (B) e reversa (C). Esses são os membros extremos, mas há um espectro contínuo de falhas oblíquas. Os estereogramas mostram o plano de falhas (grande círculo) e o vetor de deslocamento (ponto vermelho).	35
Figura 17 - Paleocondutos formados por dissolução. (b) Estereograma das fraturas associadas aos paleocondutos. (c) Diagrama de rosetas dos lineamentos de paleocondutos.	35
Figura 18 - (a) Localização da área de estudo e os principais lineamentos na região. (b) Trend principal dos lineamentos regionais. (c) Trend principal das fraturas locais.	36
Figura 19 - Perfil geotécnico, perfil geoeletrico correspondente e furos de sondagens ilustrando os diferentes horizontes de intemperismo.	36
Figura 20 - Seções interpretadas, indicando os horizontes de intemperismo (I: solo transportado, II: maciço rochoso muito intemperizado e III: maciço rochoso Semi-Intemperizada), as famílias de fraturas (F1, F2 e F3) e a localização do túnel estudado	37
Figura 21 - a) Modelo de resistividade real e seu correspondente (b) Perfil interpretado.	38
Figura 22 - Aspecto do manto de intemperismo no Carbonatito. a) ALO: Aloterito; b) ISA: Isalterito; c) RSI: Rocha Semi Intemperizada; d) Rocha Sã.	40
Figura 23 - Mapa magnetométrico de Patrocínio e Região. Os menores valores de magnetismo estão representados em azul e os maiores em rosa.	41
Figura 24 - Mapa magnetométrico dos complexos Salitre I, II, III e Serra Negra.	42
Figura 25 - Intrusão do Complexo Alcalino Salitre I, Patrocínio/MG.	44
Figura 26 - Visão geral do modelo de intemperismo.	45

Figura 27 - Seção transversal típica do modelo de intemperismo.....	45
Figura 28 - Visão geral do modelo litológico.....	46
Figura 29 - Seção transversal típica do modelo litológico	46
Figura 30 - Mapa de intemperismo da condição atual da mina.....	47
Figura 31 - Mapa da litologia da condição atual da mina.	48
Figura 32 - Lineamentos em Salitre I e seu entorno.....	49
Figura 33 - Análise dos possíveis padrões de fraturamento determinados com base na topografia.....	49
Figura 34 - Traços de falhas obtidos pela ligação de três ou mais pontos próximos obtidos das seções EW e NS.....	50
Figura 35 - Mapa de espessuras de “argilas”, elaborado por N. Chaban. Traços em preto: falhas sugeridas pelo autor. Em verde: limites de setores indicados pela eletrorresistividade. Em roxo: falhas marginais delimitando as zonas de maior espessura de sedimentos.	51
Figura 36 - Representação sintética das falhas indicadas nas Figura 31 a 34.	52
Figura 37 - Mapa geofísico dos complexos da região de Patrocínio e diagrama de roseta da área com sensoriamento remoto.....	53
Figura 38 - Estereograma e Diagrama de roseta compostos por todos os dados levantados em campo.....	54
Figura 39 - Mapa com diagramas de roseta em sua posição geográfica.	55
Figura 40 - Detalhe do mapeamento das trincas na Cava Leste e da abrangência da trinca no talude da elevação 1120m.....	56
Figura 41 - Seções de Eletrorresistividade (CE) no contexto da Cava Leste.	57
Figura 42 - Associação de regiões condutivas (valores entre 300 ohm.m e 550 ohm.m) nas seções geofísicas de CE. (a) Detalhe do contato do Magnetitito. (b) Modelo 3D do corpo friável de Magnetitito.....	58
Figura 43 - Associação de regiões condutivas (valores entre 300 ohm.m e 550 ohm.m) nas seções geofísicas de CE. (c) Correlação do modelo 3D com as ZBR's.	58
Figura 44 - Linhas de GPR localizadas nas bancadas, contexto da Cava Leste.....	59
Figura 45 - Representação de padrão de refletores no contexto da Seção L-06. Seção de GPR localizada na bancada, contexto da Cava Leste (CMP). A linha preta tracejada representa as demarcações geofísicas inferidas (horizontes e hipérboles).....	59
Figura 46 - Correlação entre assinaturas geofísicas condutivas de Eletrorresistividade (CE) com trend preferencial de família de fraturas previamente mapeadas.	60
Figura 47 - Imagens de estereomicroscópio das amostras do Flogopitito Alterado	61
Figura 48 - Detalhe do talude durante o rompimento, devida a presença de Flogopitito Alterado.	62
Figura 49 - Principais fraturas mapeadas em campo e influência sobre a drenagem na Cava Leste.....	63
Figura 50 - Resultados do Grau de Fraturamento dos furos de sondagens da Rocha Sã.	64
Figura 51 - Resultados do RQD dos furos de sondagens da Rocha Sã.	64
Figura 52 - Proporção de amostras em função da qualidade da rocha sã por litologia.	65
Figura 53 - Mapa de alinhamento das vazões dos poços associadas as falhas de Hasui (2010) e seção A-A'.....	66
Figura 54 - Perfil gerado no alinhamento de baixa vazão do PB-15 (NE-SW), neste destaca-se o topo rochoso e furos de sondagem, indicando o aumento da espessura do manto de intemperismo especificamente no CMP-SAL-DH-0231.....	67
Figura 55 - Perfil com falha interpretada, através da espessura dos horizontes de intemperismo (campanha histórica de sondagem diamantada) e Linha 5 da campanha de eletrorresistividade.	68
Figura 56 - Mapa de localização das seções de eletrorresistividade.	69

Figura 57 - a) Modelo de eletrorresistividade real das seções N-S. (b) Perfis geológicos interpretados a partir das seções N-S. (c) Modelo de eletrorresistividade real das seções E-W. (d) Perfis geológicos interpretados a partir das seções E-W. (e) Modelo de eletrorresistividade real das seções transversais e perfis geológicos interpretados NW-SE. (f) Modelo de eletrorresistividade real das seções transversais e perfis geológicos interpretados a partir das seções transversais NE-SW.	75
Figura 58 - Percolação de água em superfície.	76
Figura 59 - Poços de rebaixamento de água (PB's) e a direção de alta vazão majoritariamente em NE-SW.	77
Figura 60 - Seções interpretadas nas regiões de alta vazão.	78
Figura 61 - Perfil esquemática com as unidades hidrogeológicas definidas na região da cava.	79
Figura 62 - Distribuição das propriedades hidrodinâmicas – vista tridimensional.	80
Figura 63 - Modelo tridimensional de análise de estabilidade de taludes e dados de contorno no mínimo global da ruptura circular da Cava Final.	81
Figura 64 - Superfícies de ruptura tridimensional da Cava Final, representada em seção bidimensional.	82
Figura 65 - Mapa de locação das seções para interpretação dos lineamentos das vazões dos poços e delineamento da setorização hidrogeotécnica.	86
Figura 66 - Detalhe dos poços com alta vazão de água nas regiões de Carbonatito e sua proximidade dos corpos isolados de Foscrete (A). Poços de baixa vazão, contidos no Bebedourito, mesmo um deles estando próximo a um corpo de Foscrete (B).	87
Figura 67 - Detalhe da perda total de fluído ao interceptar os corpos de Foscrete, no horizonte de Carbonatito e essas regiões estarem “conflitando” com os taludes da Cava Final.	88
Figura 68 - Detalhe do corpo de magnetitito próximo ao Foscrete modelado por sondagens (A). Detalhe da perda total de fluído ao interceptar a Rocha São, próximo ao corpo de Foscrete e no horizonte de Carbonatito (B). Essas regiões estão próximas aos taludes da Cava Final.	88
Figura 69 - Detalhe do corpo de Foscrete entre contatos litológicos (A). Detalhe da perda total do fluido na passagem pelo Foscrete no horizonte de Carbonatito (B). Detalhe dos corpos de magnetitito em profundidade.	89
Figura 70 - Detalhe do corpo de Foscrete e a perda parcial de fluido na região do Carbonatito com contato com a Rocha São (A). Detalhe do corpo do Magnetitito na região de perda parcial/total de fluido do PB-28 (B).	90
Figura 71 - Detalhe do corpo do Magnetitito na região de perda parcial/total de fluido nos PB-07 e 29 (A). Detalhe do corpo de Foscrete e a perda total de fluido na região do Carbonatito com contato o Bebedourito (B).	90
Figura 72 - Mapa de Setorização Hidrogeotécnica da Cava Final e falhas/fraturas interpretadas por estudos anteriores.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição do grau de fraturamento dos furos de sondagem.....	20
Tabela 2 - Valores de preenchimento do resultado do cálculo obtido do RQD.	22
Tabela 3 - Propriedades hidráulicas discretizadas no modelo numérico.....	80
Tabela 4 – Descrição geológica-geotécnica e pontos de atenção durante a instalação dos poços de bombeamento de água.	82

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral (atual ANM – Agência Nacional de Mineração)

ALO - Aloterito

ISA - Isalterito

RSI - Rocha Semi-Intemperizada

RSA - Rocha Sã

BEB - Bebedourito

CBN - Carbonatito

FLO - Flogopitito

MGN – Magnetito

FET - Foscrete

NOB - Não observado

PRO – Procedimento Operacional

RQD – *Rock Quality Designation* (Designação da Qualidade da Rocha)

ISRM - *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering* (Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas)

DDP – método geofísico Dipolo-Dipolo

CE – método geofísico de Caminhamento Elétrico

DCE - Dupla Camada Elétrica

GPR – *Ground Penetration Radar* (Radar de Penetração de Solo/Terreno)

ZAR - Zonas de Alta Resistividade

ZBR - Zonas de Baixa Resistividade

ZIR - Zonas de Resistividade Intermediária

PIAP - Província Ígnea do Alto Paranaíba

GPLP – Gerencial de Planejamento de Longo Prazo

PB – Poço de Bombeamento de Água

Kx – condutibilidades hidráulica no eixo “x”

Ky – condutibilidades hidráulica no eixo “y”

Kz – condutibilidades hidráulica no eixo “z”

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Apresentação	14
1.2. Localização e Acesso.....	15
1.3. Ojetivos	15
1.3.1. Objetivo Geral.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4. Metodologia	16
1.4.1. Levantamentos de Campo.....	16
1.4.2. Descrição Geológica-Geotécnica de Testemunhos de Sondagem	20
1.4.3. Dados Geofísicos	24
1.5. Materiais.....	29
1.6. Revisão Bibliográfica.....	30
1.6.1. Terminologia das Fraturas	34
1.6.2. Permeabilidade em Zona de Falha.....	35
1.6.3 Análise Estrutural em Manto de Intemperismo	35
2. CONTEXTO GEOLÓGICO	38
2.1. Província Ígnea do Alto Paranaíba	38
2.2. Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre I.....	43
2.3. Geologia da Mina de Fosfato	44
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
3.1. Mapeamento de Trincas em Campo e a Correlação o Levantamento Geofísico	55
3.2. Caracterização Geométrica de Fraturas na Mina.....	60
3.3. Dados de Testemunhos de Sondagens.....	63
3.3. Dados Geofísicos de Eletrorresistividade, Magnetismo e GPR.....	65
3.4. Dados Hidrogeotécnicos	76
4. CONCLUSÕES.....	93
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

O fósforo tem sua principal utilização na agroindústria, onde representa um importante papel nos processos de geração de energia na produção vegetal, atuando no crescimento dos vegetais e animais, nos quais está presente em massa nos seus ossos (ULIANA, 2010).

As rochas fosfáticas são uma das principais fontes do elemento fósforo e podem ser encontradas em depósitos de origem sedimentar e de origem ígnea, sendo esse último caso de 80% dos depósitos brasileiros (ULIANA, 2010).

Dentre as jazidas de fosfato do Brasil, segundo o levantamento do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2008), o Complexo Alcalino de Salitre possuía 13,5% das reservas minerais do país. Neste contexto encontra-se a área de estudo, que possui um depósito de fosfato de origem magmática com enriquecimento supergênico, inserido no Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre I, cujos estudos de viabilidade econômica indicam uma vida útil de aproximadamente 70 anos (ANNUAL REPORT, 2020).

A intrusão do Complexo Alcalino-carbonatítico de Salitre I apresenta forma oval com dimensões aproximadas de 7 km na direção N-S e de 5 km na direção E-W e se localiza a cerca de 20 km à sudeste do município de Patrocínio, no estado de Minas Gerais (BARBOSA, 2012).

O modelo estrutural, juntamente com interpretações da geologia regional, indica a direção preferencial dos lineamentos estruturais para NW e NE (HASUI, 2009). Da mesma forma, Borges (2018) concluiu que as principais famílias de fraturas presentes no entorno de Salitre I reproduzem os lineamentos regionais NW e NE. Uma vez que o manto de intemperismo é espesso, a melhor maneira de compreender a geologia estrutural do interior do complexo é por meio do mapeamento de estruturas rúpteis preservadas, especialmente na porção saprolítica e avaliação do banco de dados de sondagens, além dos levantamentos geofísicos disponível na mineradora.

A realização do mapa de setorização hidrogeotécnica em manto de intemperismo e sua integração com dados de mapeamento estrutural, levantamentos geofísicos, modelos geológicos e vazões de poços de bombeamento de água não é realizado em mineradoras. Isto torna este projeto de pesquisa relevante, visto que, usualmente a geotecnia na mineração, normalmente se vale apenas da modelagem geológica para realização de análises de estabilidade em seções representativas e a hidrogeologia entra apenas com as questões relativas ao nível de água

subterrânea e as simulações de rebaixamento, que em última análise entram apenas como condições de contorno as avaliações geotécnicas. Contudo, o produto final propiciará a elaboração de planos de lavra de forma seguro, ou seja, sem risco a vida das pessoas, além de melhorar aproveitamento econômico do depósito mineral.

1.2. Localização e Acesso

A área de estudo está inserida no Complexo Alcalino-carbonatítico de Salitre I. Patrocínio é um município localizado na Mesorregião Alto Paranaíba distando cerca de 73 quilômetros ao norte de Araxá e a 340 quilômetros a noroeste de Belo Horizonte (Figura 1).

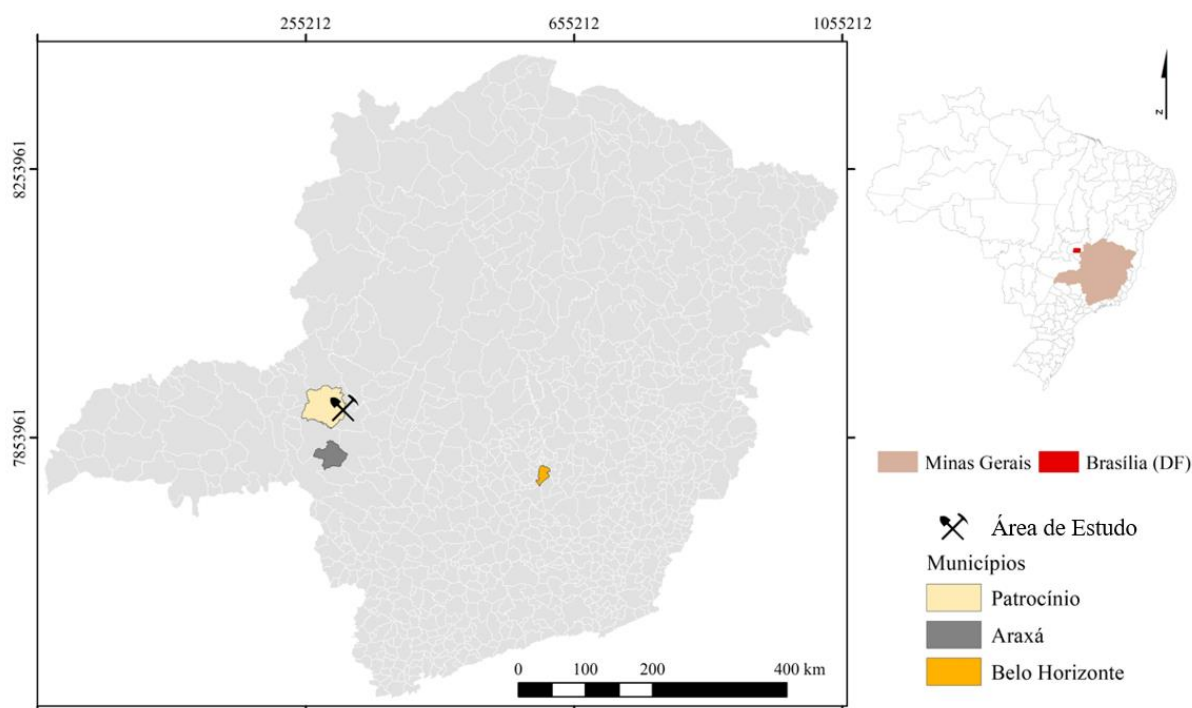


Figura 1 - Localização do município de Patrocínio/MG e da região do Salitre I (Área de estudo).

Fonte: Adaptado de IBGE, 2024.

1.3. Ojetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Compilar e interpretar as possíveis estruturas rúpteis em manto de intemperismo e zonas que possam influenciar na estabilidade dos taludes da mina, tendo com o produto final o mapa de setorização hidrogeotécnica da área de estudo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Definir as principais famílias de fraturas nas frentes de lavra, buscando correlacioná-las com os lineamentos estruturais regionais;
- ✓ Verificar a existência de estruturas e as características geomecânicas em furos de sondagem;
- ✓ Analisar os dados dos levantamentos geofísicos por eletrorresistividade e magnetometria, buscando definir limites e indicadores da presença de falhas;
- ✓ Interpretar as estruturas, correlacionando-as com o topo rochoso, os alinhamentos de falhas e fraturas, por meio de dados de geofísica e hidrogeologia;
- ✓ Gerar o mapa de setorização hidrogeotécnica da cava final.

1.4. Metodologia

A metodologia deste estudo segue uma abordagem quantitativa, com raízes no pensamento positivista lógico, destacando o raciocínio dedutivo, as regras da lógica e os atributos mensuráveis da experiência humana. No entanto, devido à avaliação observacional e à coleta de dados em campo, além do tratamento de informações de estudos anteriores, a pesquisa também assume um caráter quanti-qualitativo.

O objetivo da pesquisa é aplicativo e explicativo, buscando explorar dados suficientes para formular hipóteses e criar objetivos em contextos com pouca referência e literatura. A pesquisa possui características observacionais e comparativas. O método de abordagem é hipotético-dedutivo, visando corroborar uma hipótese pré-definida e aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos em estudos anteriores.

1.4.1. Levantamentos de Campo

O CEFET-MG, através da Fundação CEFETMINAS, realizou o mapeamento geológico-estrutural da área de estudo através da coleta em campo de dados sobre fraturamento. As medidas das estruturas rúpteis, especialmente juntas, observadas no manto de intemperismo

foram coletadas diretamente nos taludes da mina. Esse trabalho teve como objetivo a obtenção das direções preferenciais do fraturamento em escala local, podendo ser correlacionadas com as estruturas já conhecidas em escala regional (CEFET, 2019).

No estudo do CEFET, foram catalogadas 532 fraturas das áreas chamadas de Cavas Norte, Leste e Sul, elas foram agrupadas pela sua localização, sendo as de interesse 240 fraturas situadas na região da Cava Leste e 117 fraturas na Cava Sul (Figura 2).

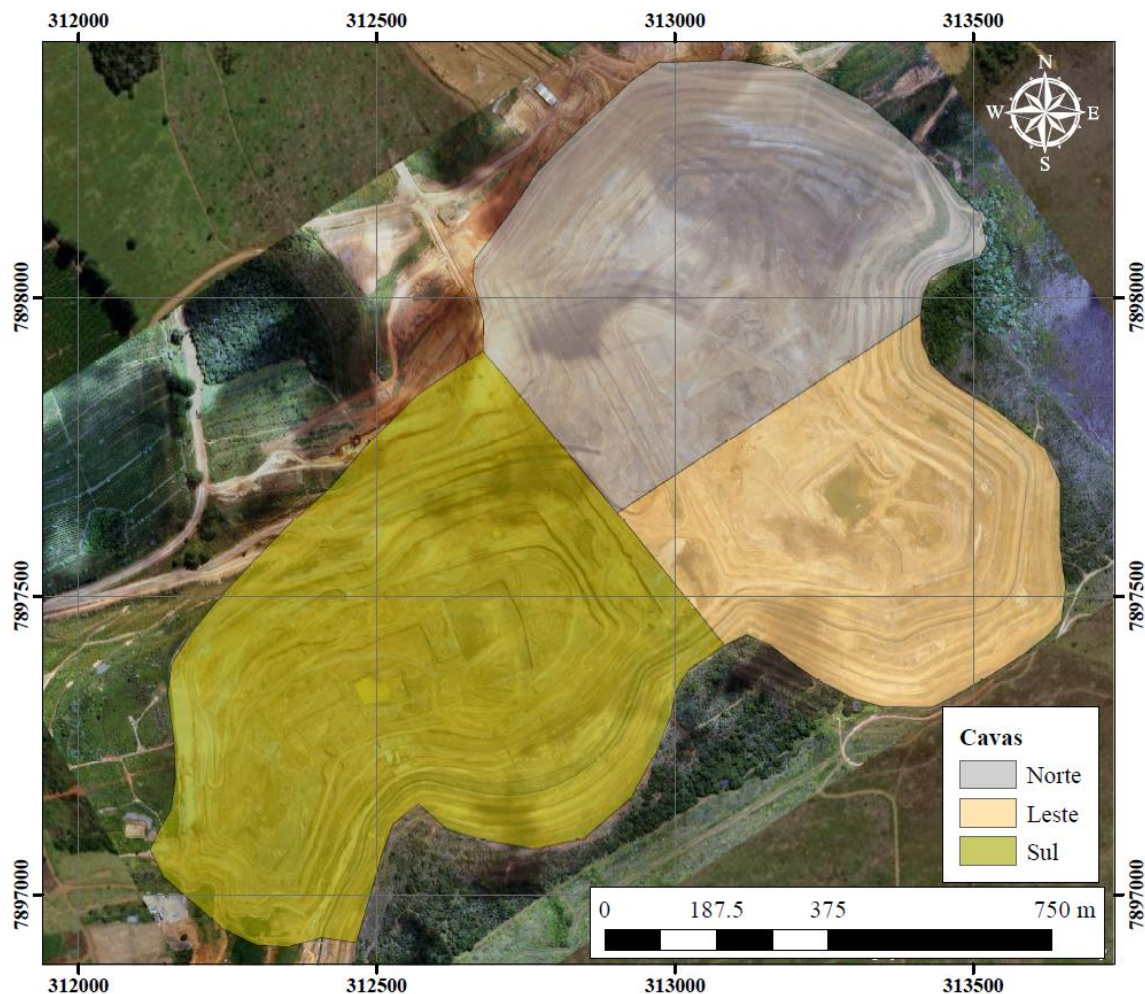


Figura 2– Mapa de localização das cavas.

Fonte: Autor, 2024.

Na Cava Leste, observou-se que a principal família de fraturas possui direção N-S com mergulho médio de 57° . Além dessa, outras duas famílias são observadas com atitude quase horizontal e outra com direção WNW quase vertical (Figura 3).

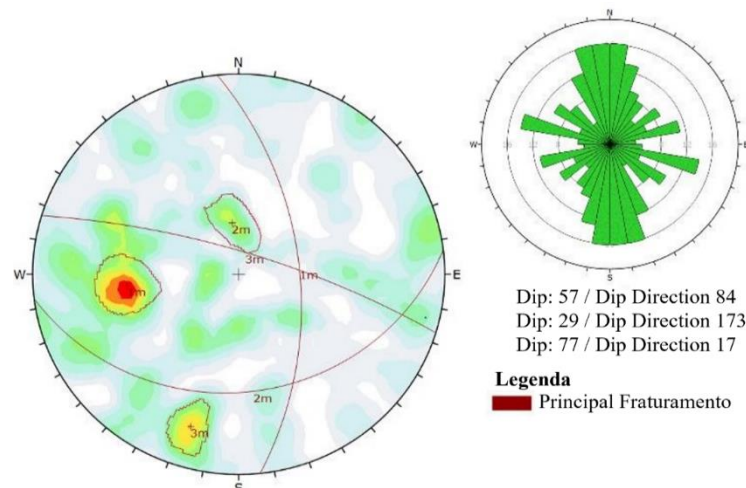


Figura 3 - Estereograma e diagrama de Roseta da Cava Leste. Valores médios de Mergulho e Direção do Mergulho.
Fonte: CEFET (2019).

CEFET (2019), observou na Cava Sul que o padrão de fraturamento é preferencialmente NW-SE, com mergulhos variando de 75° a 90°. Outra família de fraturas observada, porém, com menor representatividade, possui direção N-S e mergulho médio quase horizontal (Figura 4).

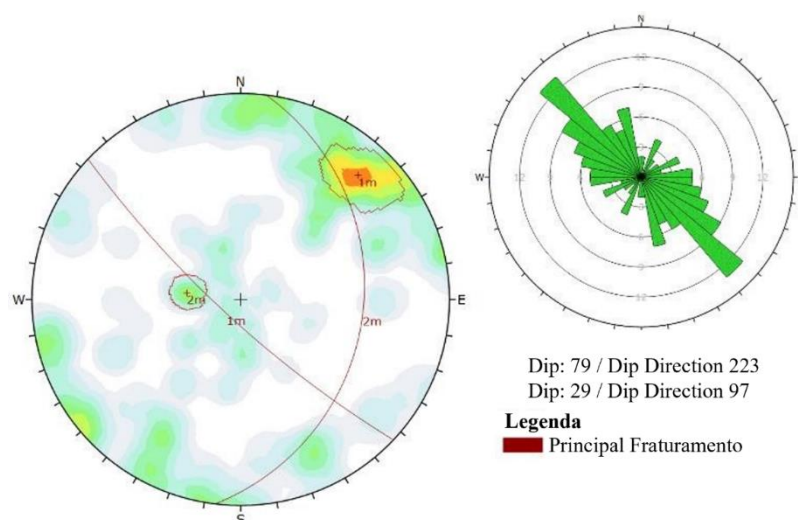


Figura 4 - Estereograma e diagrama de Roseta da Cava Sul. Valores médios de Mergulho e Direção do Mergulho.
Fonte: CEFET (2019).

A Cava Sul foi dividida em 6 regiões (Figura 5), devido à correlação entre as famílias de fraturas mapeadas. Na Região 5 apresenta um forte padrão E-W aproximadamente vertical, já de 6 a 8 são observadas fraturas NW-SE, com mergulho vertical, porém nesta última está

tendendo a E-W (6).

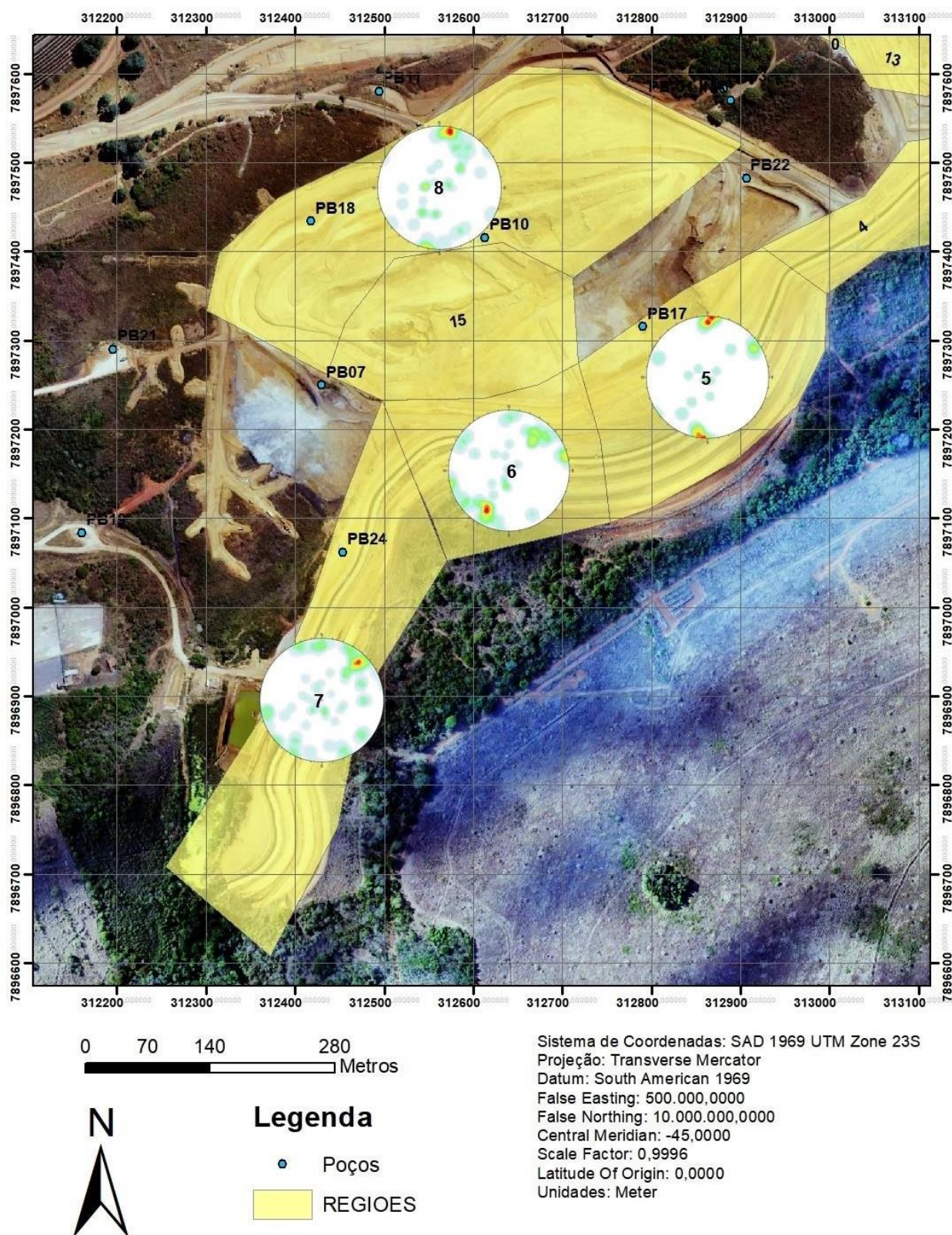


Figura 5 - Estereogramas em suas respectivas regiões na Cava Sul.

Fonte: CEFET, 2019.

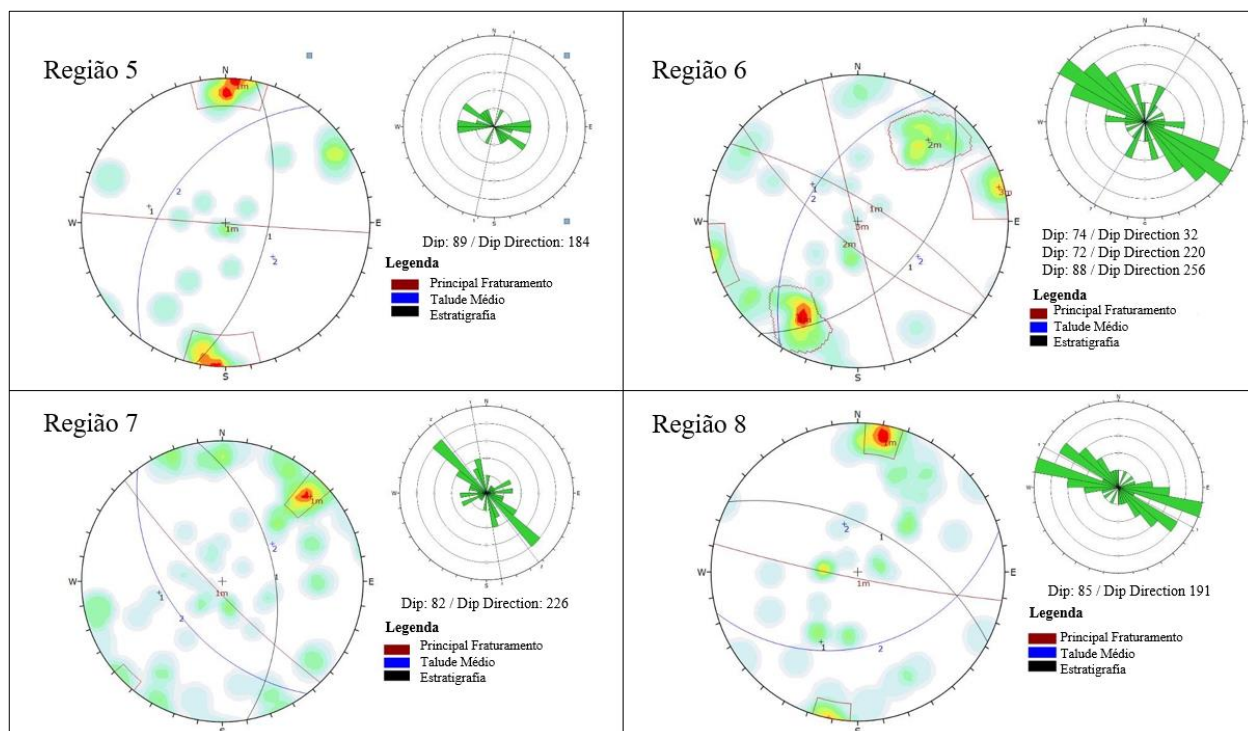


Figura 6 - Estereograma e diagrama de Roseta das Regiões delimitadas na Cava Sul. Valores médios de Mergulho e Direção do Mergulho.

Fonte: Adaptado de CEFET, 2019.

1.4.2. Descrição Geológica-Geotécnica de Testemunhos de Sondagem

A Tabela 1, sumariza o procedimento operacional da empresa responsável pela mineração da área em estudo, padronizou a descrição geotécnica referente ao Grau de Fraturamento do testemunho de sondagem, que compreende os itens da tabela abaixo (PRO-0920-000-007-01-06, 2020).

Tabela 1 - Descrição do grau de fraturamento dos furos de sondagem.

Código	Grau de Fraturamento	Descrição
1	Maciço	Espaçamento das fraturas > 200 cm 1 fratura a cada 3 metros
2	Pouco Fraturado	Espaçamento das fraturas entre 200 e 60 cm 2 a 3 fraturas a cada 3 metros 0 a 1 fraturas por metro
3	Moderadamente Fraturado	Espaçamento das fraturas entre 60 e 20 cm 4 a 10 fraturas a cada 3 metros 2 a 5 fraturas por metro
4	Muito Fraturado	Espaçamento das fraturas entre 20 e 6 cm 11 a 30 fraturas a cada 3 metros 6 a 10 fraturas por metro
5	Intensamente Fraturado	Espaçamento das fraturas entre 6 e 2 cm

		30 a 60 fraturas a cada 3 metros 11 a 20 fraturas por metro
6	Fragmentado	Espaçamento das fraturas entre < 2 cm 60 fraturas a cada 3 metros >20 fraturas por metro

Fonte: PRO-0920-000-007-01-06, 2020.

A designação de qualidade da rocha (RQD) foi introduzida por Don Deere em meados da década de 1960 como um meio de usar o furo de sondagem diamantada para classificar rocha para fins de engenharia. Posteriormente, foi incorporado na classificação do maciço rochoso (RMR) e na classificação do sistema Q. Esses métodos desempenham, em todo o mundo, papéis substanciais no projeto de mecânica de rochas, seja para túneis, fundações, rochas de encostas ou escavação em rocha.

Uma revisão de 20 anos de experiência com RQD foi dada por Deere & Deere (1989) em um relatório para o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (Figura 4). Eles enfatizaram três características essenciais do RQD:

1. Realiza a avaliação da qualidade do maciço rochoso em amostras de testemunho, geradas por furos de tubo duplo, normalmente com 55 mm de diâmetro.
2. Apenas amostras de furo com comprimentos superiores a 4 polegadas (100 mm) separados por fraturas mecânicas naturais devem ser incluídos. As fraturas abertas pela perfuração deveriam ser ignoradas.
3. “Pedaços de furo que não são 'duros e sólidos' (ISRM, 1978) não devem ser contados para o RQD, mesmo que possuam o comprimento necessário de 4 pol. (100 mm).”

O RQD foi concebido como mais do que um índice de espaçamento de fratura (Figura 7). Nas palavras de Deere (1989), "RQD é um índice de qualidade da rocha, no qual aquela rocha problemática que é altamente intemperizada, macia, fraturada, cisalhada e articulada, conta contra a massa rochosa. Portanto, é simplesmente uma medição da porcentagem de rocha 'boa' recuperada de um intervalo de um furo de sondagem.”

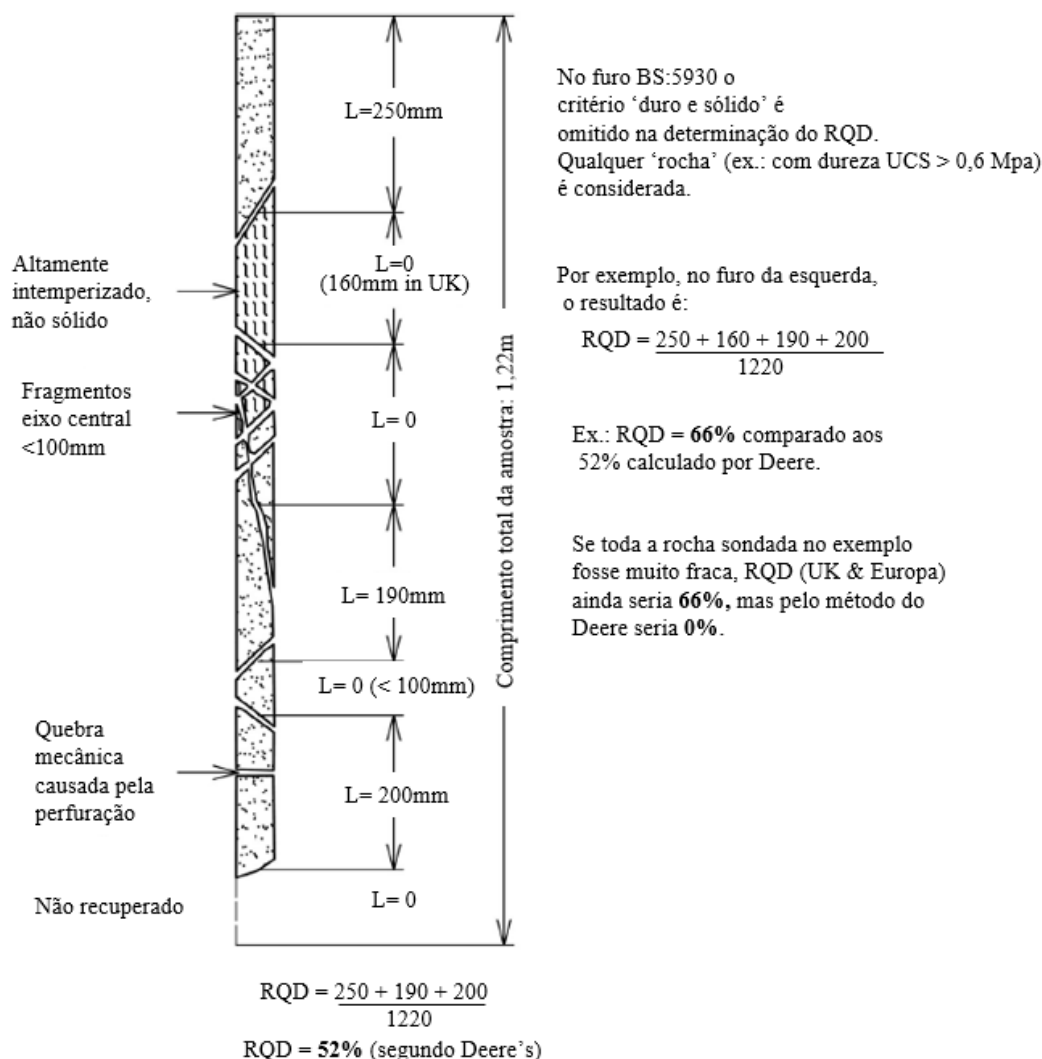


Figura 7 - Determinação da Designação de Qualidade da Rocha (RQD) de acordo com Deere e Deere (1989) e de acordo com a prática atual no Reino Unido e na Europa.

Fonte: Adaptado de Pells, 2017.

Após obter o resultado do cálculo, o campo RQD da planilha *Excel* é preenchido conforme o Procedimento Operacional (PRO-0920-000-007-01-06, 2020), selecionando uma das faixas de valores estabelecidas no *Picklist* (atributo de lista de opções no software *Excel*), de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de preenchimento do resultado do cálculo obtido do RQD.

Código	Espaçamento (%)	Descrição
1	0-25	Muito Pobre
2	25-50	Pobre
3	50-75	Regular
4	75-90	Bom

5	90-100	Excelente
NA	Não se Aplica	$R < 2$ / Não recuperado
NI	Não informado	Por qualquer motivo não é possível descrever.
NOB	Não Observado	-

Fonte: PRO-0920-000-007-01-06, 2020.

Na execução dos furos de sondagem, o ângulo entre o furo e o conjunto de juntas principais pode influenciar fortemente no número de juntas encontradas no testemunho (*Figura 8*). A perfuração descuidada facilmente introduzirá a quebras adicionais no testemunho do furo da sondagem.

Um erro recorrente está associado às quebras criadas durante a perfuração, que são contadas ou medidas como juntas no testemunho de sondagem, apresentando um grau de junção superior ao real. Portanto, é importante estudar as extremidades de cada broca da perfuração durante o registro do furo, para descobrir se são juntas reais ou quebras criadas durante o processo de perfuração (PALMSTRÖM, 2001).

Importante destacar que, infelizmente, tais premissas citadas acima não foram consideradas durante as execuções/anotações em campo nas sondagens históricas, com isso não foi possível realizar/sinalizar os possíveis conjuntos de juntas e/ou falhas por estes profissionais.

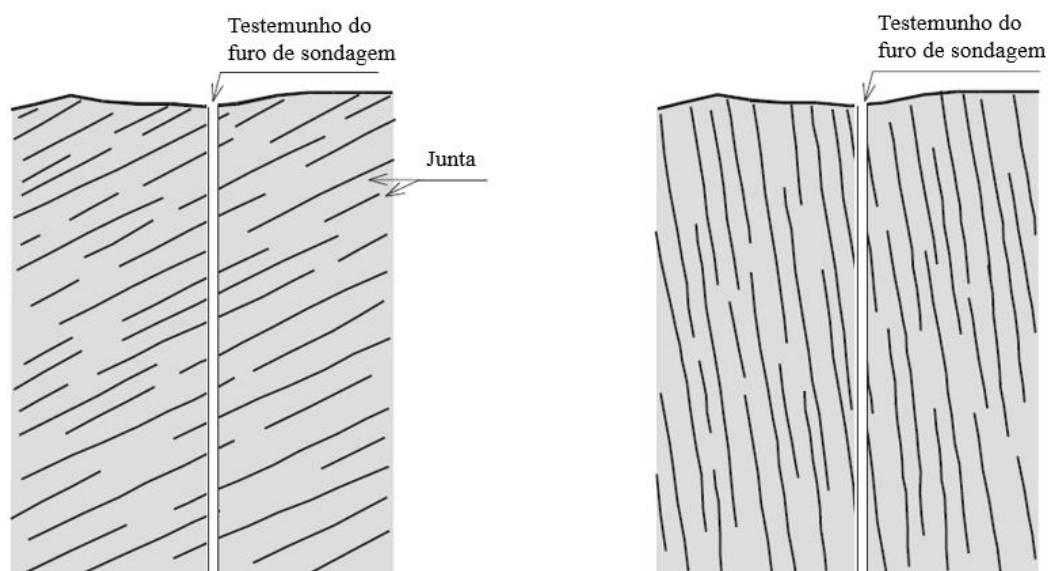


Figura 8- Detalhe de como o ângulo entre as juntas e o furo da perfuração pode influenciar fortemente no comprimento das peças do testemunho.

Fonte: Adaptado de Palmström, 2001.

De maneira a exemplificar os RQD's e Graus de Fraturamentos dos testemunhos de

sondagens da região do estudo, segue a esquematização em rochas carbonatíticas da mina (Figura 9).

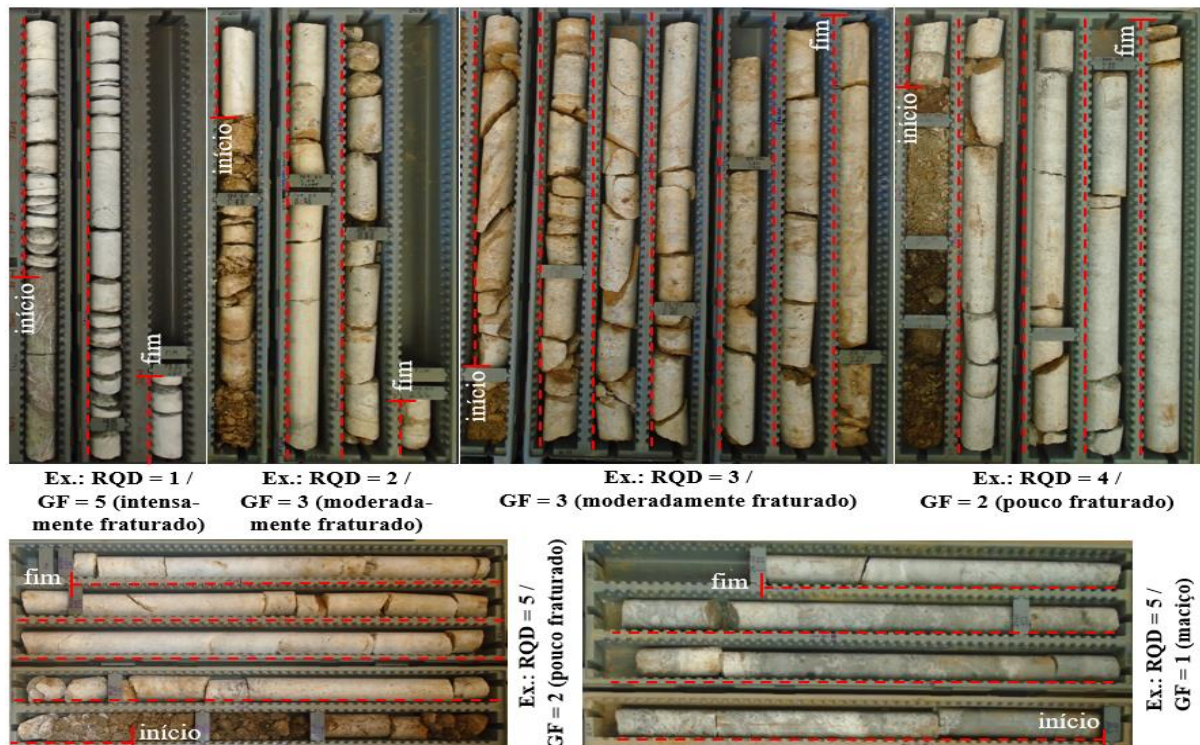


Figura 9 - Detalhes dos exemplos de RQD e Grau de Fraturamento dos testemunhos de sondagens das rochas carbonatíticas da mina.

Fonte: Autor, 2024.

1.4.3. Dados Geofísicos

Métodos geofísicos tem se mostrado muito úteis em prospecção de subsuperfície, especialmente na detecção de zonas saturadas e/ou diferenciação de materiais. O sucesso na prospecção depende da habilidade em alcançar o alvo assim como a utilização de apropriada resolução vertical para cada problema proposto. Neste cenário, foi proposto, para o presente trabalho, a integração de diferentes métodos geofísicos, identificando parâmetros físicos diferenciados e complementares para a obtenção de um conjunto de dados necessários ao objetivo apresentado.

A investigação geofísica em sítios de rocha fraturada e intemperizada cai em duas categorias principais: caracterização da estrutura hidrogeológica que controla o fluxo de água subterrânea e o transporte de contaminantes e monitoramento do transporte de contaminantes e a eficácia das estratégias de remediação de contaminantes. Os objetivos de caracterização específicos podem incluir a determinação da localização e continuidade das principais fraturas,

zonas de falhas e/ou plano de estratificação, bem como a determinação de zonas de fraturamento em microescala. Algumas tecnologias de perfilagem geofísica de poço têm o potencial de caracterizar pequenas fraturas individuais que cruzam a parede do poço, mas levantamentos geofísicos em escala maior podem não ter a resolução para ver fraturas individuais (LEWIS *et al.*, 2018).

As propriedades geofísicas da rocha fraturada são determinadas pelas propriedades intrínsecas do sólido, bem como pelas fases líquida e gasosa que preenchem as fraturas. O arranjo geométrico e a conectividade das fraturas também influenciam fortemente certas propriedades geofísicas, como a condutividade elétrica, à qual os métodos elétricos, eletromagnéticos e de radar são sensíveis. As propriedades geofísicas das próprias fraturas são fortemente controladas pelos fluidos que as preenchem. O movimento de contaminantes e a introdução e quebra de substâncias que estimulam o crescimento de microrganismos podem modificar a composição química dos fluidos em fraturas de rochas ou solo. O transporte reativo e os tratamentos de remediação podem alterar a geometria e a conectividade das fraturas, por exemplo, através da dissolução da rocha ou precipitação das fases minerais, e estas mudanças também são potencialmente detectáveis por meio de geofísica. As propriedades elétricas das rochas fraturadas são determinadas principalmente pela condução eletrolítica que ocorre através de fraturas preenchidas com fluido, bem como a condução iônica na Dupla Camada Elétrica (DCE). A DCE consiste em uma camada de cargas positivas na superfície do eletrodo e outra na camada de carga negativa na solução, próximo a primeira (ou vice versa), formando-se então nas interfaces de fratura-fluído (GLOVER, 2015).

Eletrorresistividade

A eletrorresistividade é um método geofísico baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais, sendo utilizado nos mais variados campos de geologia, hidrogeologia, geotecnia, geologia ambiental, engenharia entre outros.

Os ensaios de Eletrorresistividade foram através da técnica de caminhamento elétrico, onde o arranjo de eletrodos escolhido para a realização dos perfis foi o Dipolo-Dipolo (DDP), principalmente por apresentar considerável relação sinal-ruído assim como satisfatória relação profundidade de investigação versus resolução lateral (NEOGEO, 2018).

Ground Penetration Radar

Ground Penetrating Radar (GPR) ou Radar de Penetração no Solo é um método geofísico não invasivo e que utiliza ondas eletromagnéticas com frequências entre 10 a 2.500 MHz para o mapeamento de feições geológicas, localizar poluentes no subsolo em fases adsorvidas, dissolvidas e livres, bem como estruturas antrópicas e objetos enterrados pelo homem. Para a interpretação dos dados de GPR foram utilizados conceitos de radar-estratigrafia (RIBEIRO, 2001), com individualização das diferentes fácies presentes em cada seção de GPR, em termos de estrutura interna dos refletores, tais como: forma, mergulho, relação e continuidade.

Magnetometria

Entre os dias 22 e 26 de fevereiro de 2020 foi realizado um levantamento magnetométrico ao longo de caminhamentos com direção NW-SE (especificamente na região das cavas Norte e Sul) definidos preliminarmente de acordo com dados da geologia da mina, totalizando aproximadamente 30,91 km de levantamento terrestre com espaçamento de malha de 40 metros entre os perfis com a aquisição de 7912 pontos com medidas de campo magnético (Figura 10).

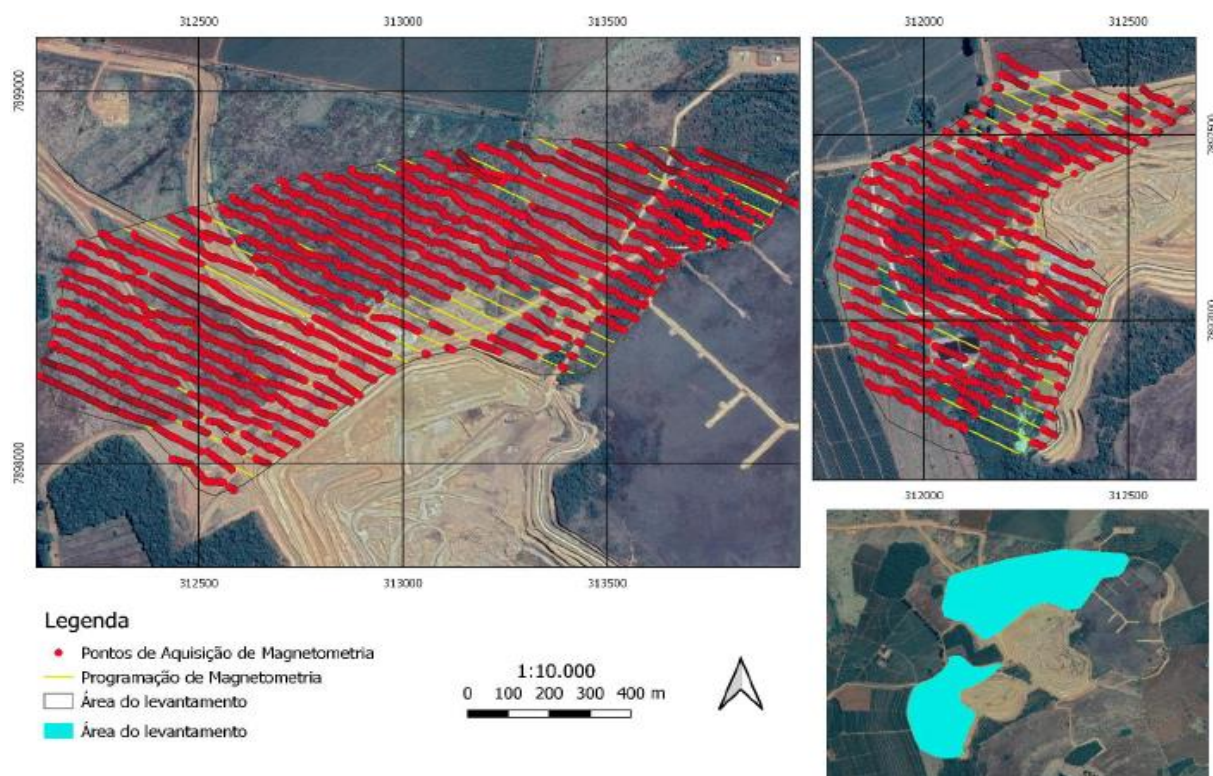


Figura 10 - Pontos do levantamento geofísico realizados em campo (Cava Norte e Sul).

Fonte: Relatório Parcial (Projeto 070120), 2020.

Após a escolha do *grid* os dados foram processados e pode-se comentar de maneira superficial que a região nordeste da cava apresentou anomalias magnéticas de maior intensidade e com uma leve direção de mergulho para NE em médio ângulo (Figura 11), essas regiões marcadas como anômalas, são regiões em que são recomendadas uma maior atenção na amostragem, pois possuem uma maior tendência de conter concentrações de magnetita nos foscoritos.

No entanto, é possível notar na imagem do sinal analítico uma estruturação de direção NW-SE nas anomalias da área norte, fato que fica mais evidente na imagem filtrada (Figura 12) e na primeira derivada vertical (Figura 13). Na parte sul, é possível notar uma estruturação quase E-W, condizente com o perfil de alteração dos diques que cortam a mina do Complexo de Salitre I.

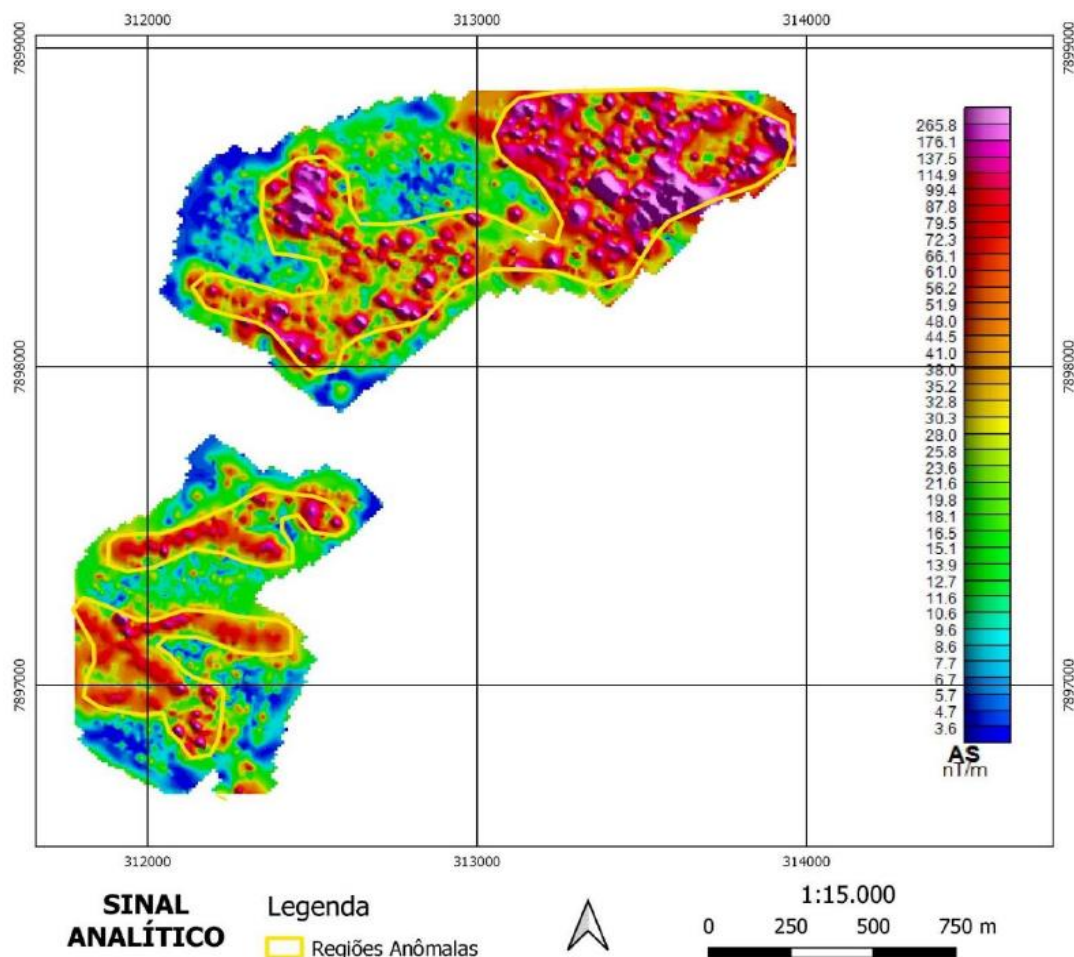


Figura 11 - Imagem do filtro do sinal analítico sem a aplicação de filtros mostrando as regiões com maior intensidade magnética na área.

Fonte: Relatório Parcial (Projeto 070120), 2020.

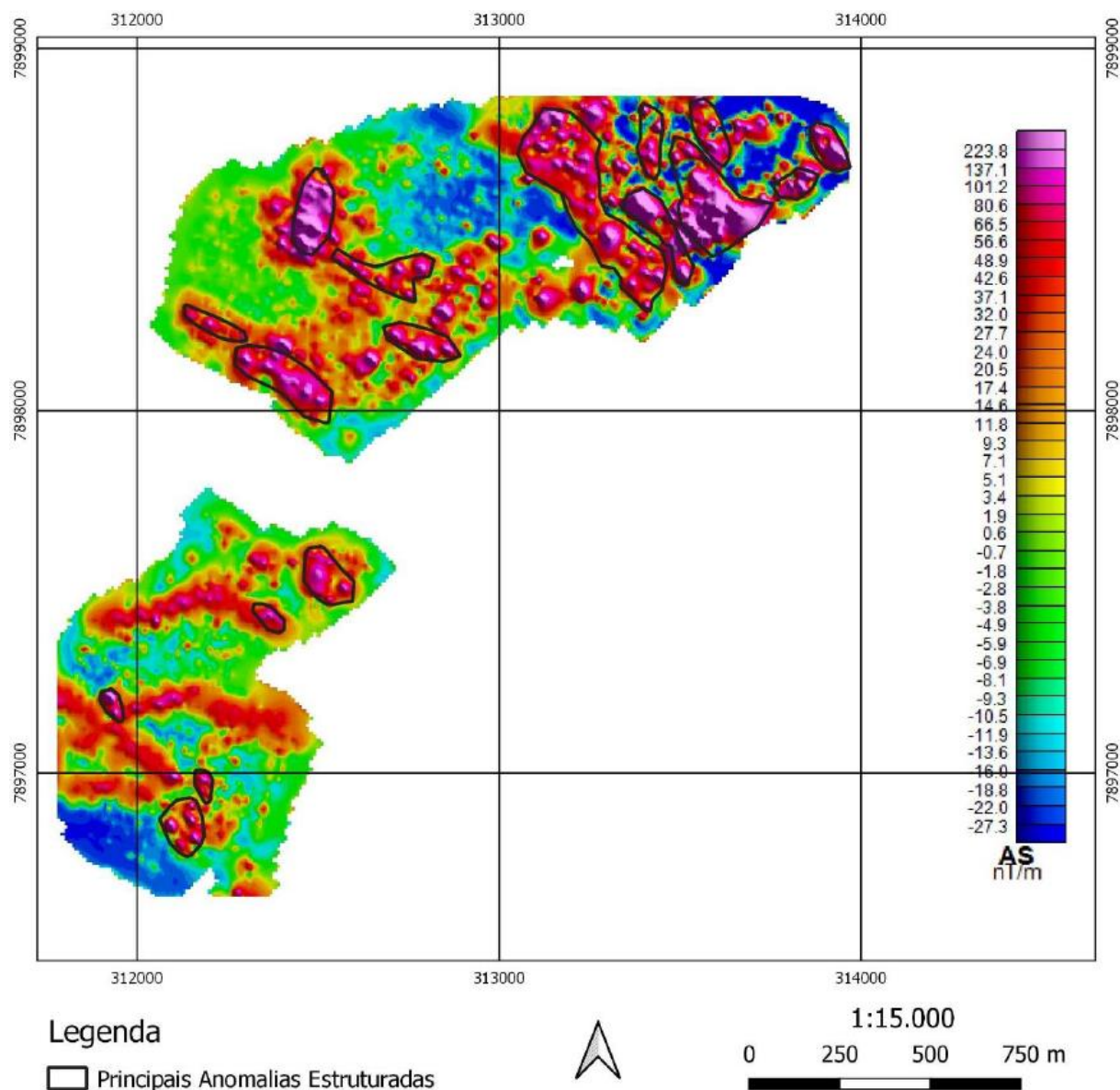


Figura 12 - Imagem do filtro do sinal analítico filtrada, onde fica mais evidente uma estruturação nas anomalias de direção NW-SE.

Fonte: Relatório Parcial (Projeto 070120), 2020.

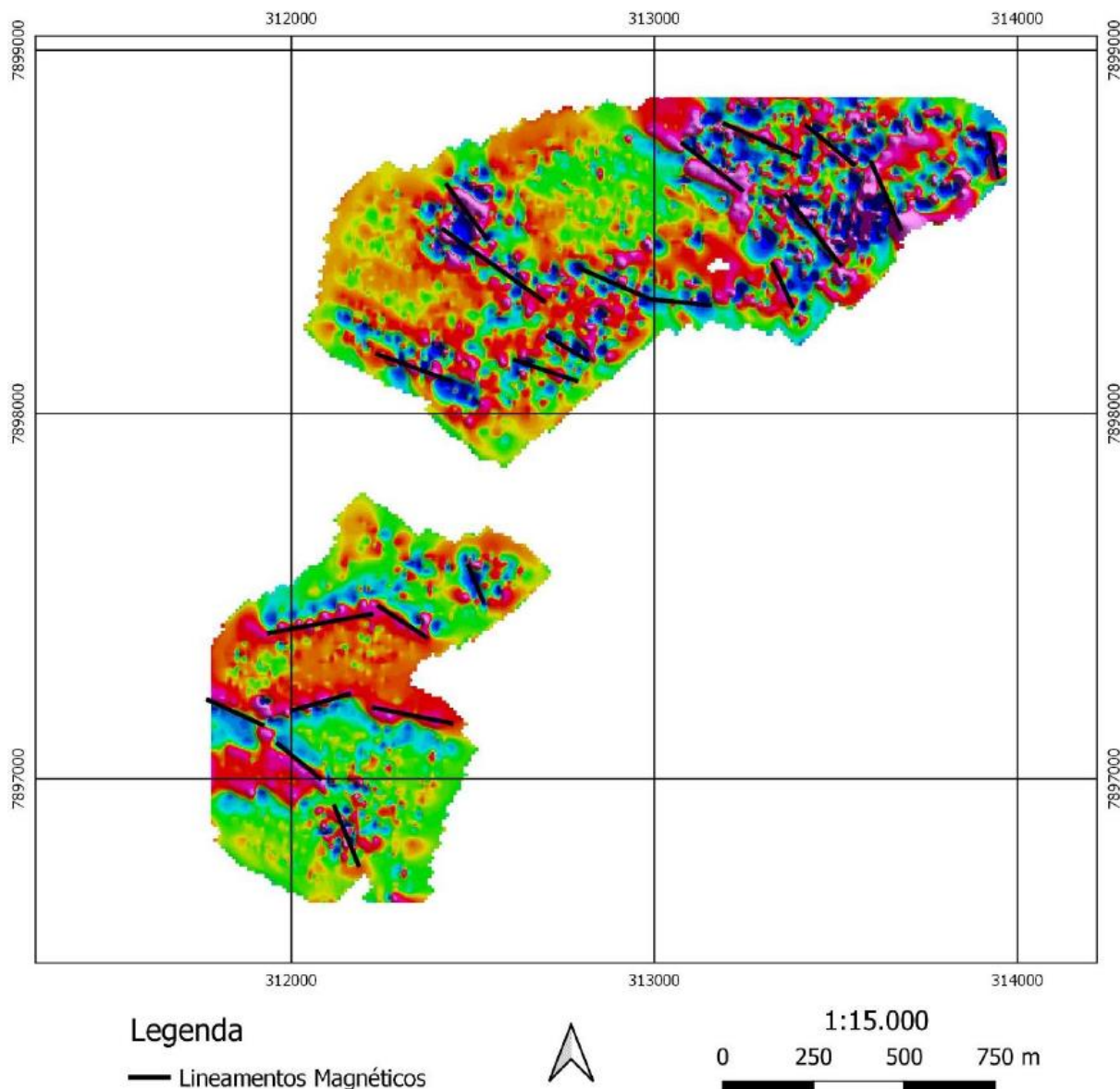


Figura 13 - Imagem da derivada vertical (dZ) que mostra uma forte estruturação das anomalias no eixo Z na direção NW-SE.

Fonte: Relatório Parcial (Projeto 070120), 2020.

1.5. Materiais

A interpretação dos lineamentos das falhas, das vazões dos poços de bombeamento de água e da setorização hidrogeotécnica foi realizada por meio do mapeamento estrutural em campo por Hasui (2010), CEFET (2019), NEOGEO (2018) GERÊNCIA DE PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO (2019), além de dados internos da empresa como o modelo hidrogeológico (2023), modelo geológico, dados dos poços de rebaixamento, descrições geológico-geotécnicas e inspeções geotécnicas históricas.

O banco de dados de sondagens geológicas da empresa de mineração atuante na área de

estudo, possui informações referentes ao grau de alteração e fraturamento, resistência, compacidade e presença de descontinuidades nos furos executados desde a década de 60 até o momento atual. Esses dados foram utilizados para apoiar na interpretação das estruturas.

Com base nos registros de vazões dos poços de rebaixamento, associados às estruturas interpretadas nas etapas anteriores, buscou-se inferir a presença de condutos de percolação de água subterrânea.

Para execução deste trabalho, foram utilizados os seguintes *softwares*:

- ✓ *ArGis GeoAnalytics* 10.3: geração dos mapas e avaliações dos lineamentos das possíveis falhas, geração do mapa de setorização hidrogeotécnica da Cava Final;
- ✓ *AutoCad* (Civil 3D): gerar as seções através das informações geológicas, geotécnicas, geofísicas, hidrogeológicas e mapeamentos de campos;
- ✓ *Datamine®* (RM e OP): gerar as seções das informações geológicas, geotécnicas, geofísicas, hidrogeológicas, mapeamentos de campos, Cava Atual e Cava Final (melhor visualização 3D).

1.6. Revisão Bibliográfica

A ação do intemperismo é facilitada por sistemas de fraturas nas rochas, permitindo que superfícies minerais interajam com águas corrosivas e biota da superfície da Terra. Isso promove simultaneamente drenagem de fluidos quimicamente equilibrados (ABRAHAM, 1994).

O intemperismo em profundidade pode ser investigado pela condutividade hidráulica, porosidade da rocha e taxa de infiltração por pluviosidade na rocha, que juntos determinam quão rapidamente a água subterrânea flui (REMPE & DIETRICH, 2014). Outra hipótese, baseada na modelagem de transporte reativo, prevê que a evolução da zona intemperizada depende do equilíbrio entre a cinética da reação mineral e tempos de residência na água subterrânea (LEBEDEVA & BRANTLEY, 2013; MAHER & CHAMBERLAIN, 2014). Ambas as hipóteses enfatizam a importância do fluxo de fluido através da rocha, relacionado ao desenvolvimento de sistemas de fraturas, que fornecem fluxo de fluido por caminhos preferenciais na rocha (LONG *et al.*, 1991; OWEN *et al.*, 2007).

Um estudo interessante foi o de Gomes (2017), localizado no Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, onde realizou-se ensaios de permeabilidade de campo em saprolito demonstrando grande variedade de resultados de condutividade hidráulica em todo o perfil de intemperismo, entre $5,0 \times 10^{-5}$ m/s e $1,0 \times 10^{-7}$ m/s na porção de solo intemperizado até a

transição para a rocha sã. Este trabalho está inserido na Província Ígnea do Alto Paranaíba, que possui um alinhamento e está no contexto geológico de Salitre I.

Levantamentos geofísicos de sísmica e resistividade elétrica auxiliam na obtenção de imagem da espessura do manto de intemperismo. Quando os levantamentos são realizados ao longo dos mesmos transectos, permitem investigar as tensões topográficas que influenciam na geometria da zona intemperizada. A estrutura de velocidade sísmica reflete as variações do grau de alteração da rocha, como intemperismo químico e fraturamento (BARTON, 2006) os quais contribuem a um aumento na porosidade e uma diminuição na velocidade de propagação da onda sísmica (HOLBROOK *et al.*, 2014). Velocidade de propagação em rochas fraturadas também pode aumentar com maior saturação de água (BARTON, 2006; NUR & SIMMONS, 1969).

Place *et al.* (2016), ao realizarem um estudo nas cordilheiras costeiras da Catalunha na Espanha, concluíram que a combinação de métodos sísmicos e elétricos é adequada para caracterizar o intemperismo de rochas cristalinas fraturadas. Além disso, a ocorrência de estruturas rasas e sub-horizontais é descrita em relação ao intemperismo e os métodos de radar. Portanto, esse método é relevante na investigação de processos de intemperismo, especialmente para complementar métodos sísmicos e de tomografia elétrica (geofones) com baixas resoluções (Figura 14). A análise deste conjunto de dados multimétodos e complementares revelou que, em profundidade rasa, as propriedades geofísicas dos materiais são compartimentadas e assimétricas em relação a falhas principais e subsidiárias que afetam a massa rochosa. Interpretaram também essa compartimentação como resultado do papel dos limites hidráulicos e mecânicos desempenhados pelas falhas subsidiárias, que tendem a governar as alterações químicas e físicas envolvidas no intemperismo. Assim, o modelo de intemperismo pode ser fortemente assimétrico e apresentar contornos altamente irregulares (Figura 15), delimitando contrastes acentuados e contornos altamente irregulares delimitados nos contrastes dos dados geofísicos.

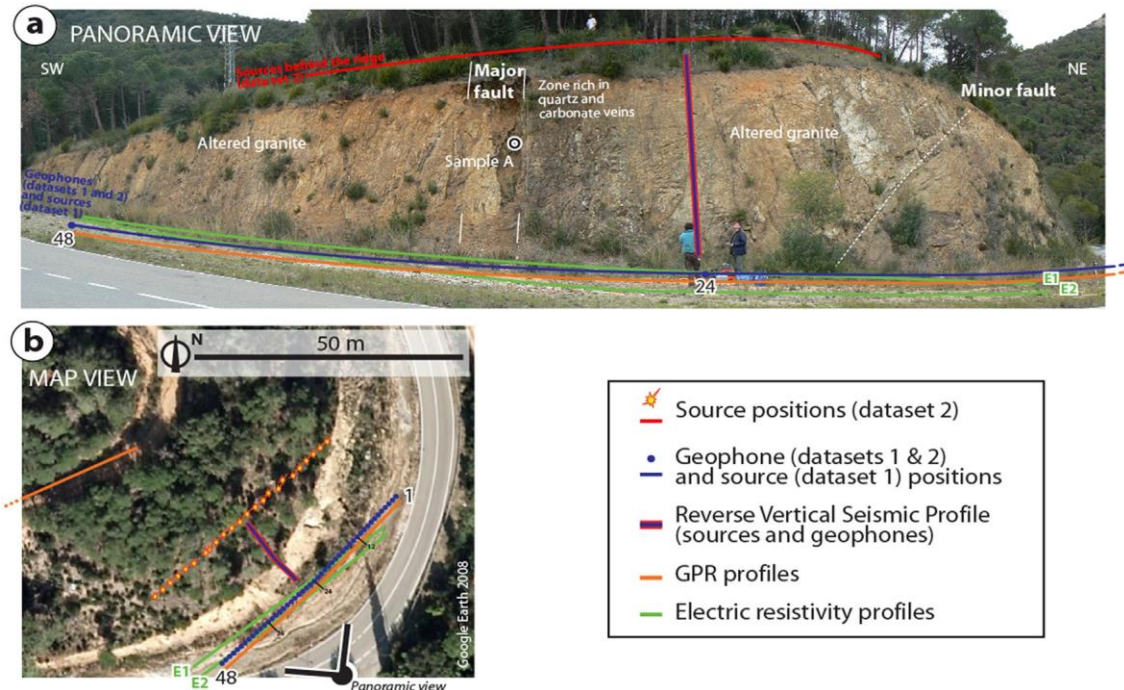


Figura 14 - Vistas panorâmica (a) e de mapa (b) do local de Canyet mostrando a posição do equipamento geofísico.

Fonte: Place *et al.* (2016).

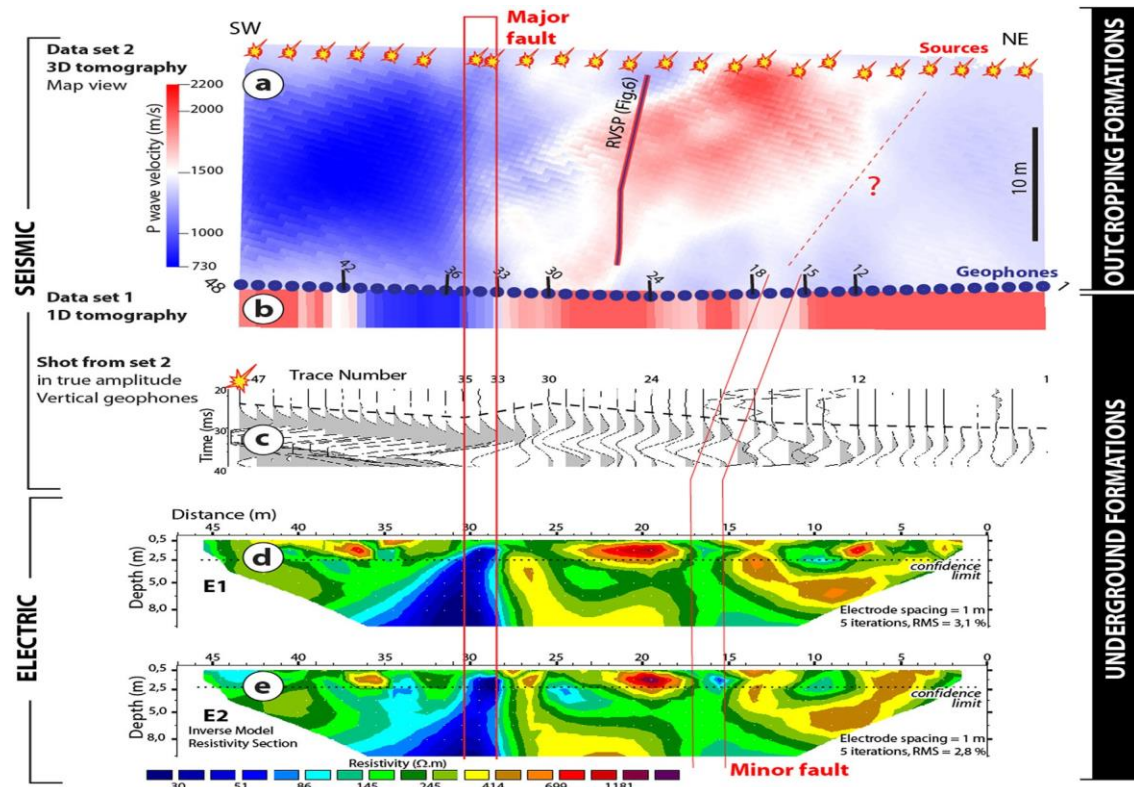


Figura 15 - Resultados dos levantamentos geofísicos realizados no afloramento de Canyet. Nas formações de afloramento, o campo de velocidade da onda P é fortemente assimétrico em relação à falha principal, enquanto a velocidade da onda P e a resistividade elétrica exibem uma distribuição significativamente mais simétrica em profundidade.

Fonte: Place *et al.* (2016).

Conforme observado no estudo de Place *et al.* (2016), falhas em solos saprolíticos podem ser iniciadas por estruturas pré-existentes, estruturas precursoras, ou através de zonas de cisalhamento contínuas. Esses estilos de iniciação, e o crescimento subsequente das zonas de falha, podem influir nas características das rochas, bem como no fluxo de fluido ao longo das falhas (KNIPE, 1997; HERSTHAMMER & FOSSEN, 2000). O reconhecimento do estilo de iniciação e propagação das falhas também é importante para entender a maneira como a tensão se acumula em uma região. Visto que essas descontinuidades podem ser reativadas por esforços posteriores, e caso esses ultrapassem a resistência ao cisalhamento, ocasionam uma ruptura localizada ou de maior proporção (RECHES & LOCKNER, 1994; COWIE *et al.*, 1995; KNOTT *et al.*, 1996). Falhas geralmente formam zonas complexas de interação e segmentos vinculados, e esta segmentação pode estar associada à maneira pela qual a falha inicia e cresce (AYDIN & SCHULTZ, 1990; PEACOCK & SANDERSON, 1996).

A fase inicial da pesquisa de campo trata do levantamento de dados geológico-geotécnicos do maciço rochoso. O mapeamento geológico e a investigação geotécnica devem atender aos critérios necessários à elaboração do modelo estrutural de forma consistente, a fim de caracterizar o corpo rochoso com o máximo de fidelidade (READ & STACEY, 2009).

O modo de ocorrência da falha em um talude é dependente diretamente do modelo geológico e características estruturais da rocha (MENEZES *et al.*, 2019). A realização de mapeamento geológico-geomecânico, e descrições geotécnicas de furos de sonda, fornecem conhecimento sobre a rocha. Associado à isso, registros de vazão de poços permitem a identificação de conjuntos de fratura, bem como o reconhecimento do controle dessas estruturas sobre o fluxo de água subterrânea na área.

Bense *et al.* (2013), após compilarem informações de várias regiões no mundo, mencionam que a avaliação direta do impacto das falhas nos padrões de fluxo de fluidos continua sendo um desafio e exige um esforço de pesquisa multidisciplinar de geólogos estruturais e hidrogeólogos. Observaram em superfície e subsuperfície de diversos tipos de rochas os mecanismos de deformação geológica, as observações hidrogeológicas e os modelos conceituais da hidrogeologia da zona de falha. Essas avaliações de afloramento indicaram que as zonas de falha geralmente têm uma estrutura de permeabilidade que sugere que elas devem atuar como sistemas complexos de conduto. Também que as condições hidrogeológicas das zonas de falha relatadas na literatura mostram uma ampla concordância qualitativa com os modelos conceituais baseados em afloramentos da hidrogeologia destas zonas. No entanto, o impacto específico de uma determinada estrutura na permeabilidade da zona de falha, só pode

ser avaliado quando o contexto hidrogeológico desta é considerado e não apenas a partir de observações de afloramento.

1.6.1. Terminologia das Fraturas

De acordo com Fossen (2012), fraturas e outras descontinuidades existentes são estruturas relativamente simples. As falhas são muito mais complexas e podem acomodar grande quantidade de deformação na crosta superior da Terra. O termo falha é usado de diferentes modos, dependendo do contexto. Ainda segundo Fossen (2012, v. 1, p. 204), “uma falha é qualquer superfície ou faixa estreita onde é visível um deslocamento causado por cisalhamento.”

Juntas se comportam como condutos preferenciais para percolação de fluidos. Assim como as falhas, as juntas também acarretam em porosidade e permeabilidade para as rochas (FOSSEN, 2012). Esse potencial para percolação de fluidos faz com que áreas com famílias de juntas tenham maior potencial para instabilidade geotécnica.

A definição mencionada por Fossen é semelhante à da estrutura de cisalhamento. Alguns geólogos referem-se às fraturas de cisalhamento com rejeitos milimétricos ou centimétricos como microfalhas. No entanto, há uma tendência para restringir-se o uso do termo fratura de cisalhamento às estruturas de pequeno porte e de aplicar-se o termo falha às estruturas mais bem desenvolvidas, com rejeitos da ordem de 1 metro ou mais.

As falhas possuem tendência de formar zonas complexas de deformação, com múltiplos planos de cisalhamento, fraturas subsidiárias e, em alguns casos, bandas de deformação. Isso é particularmente visível quando se considera grandes falhas, com rejeitos de porte quilométrico. Elas podem ser consideradas falhas simples em um mapa ou em um perfil sísmico, mas poderão ser descritas como um conjunto de planos de falha. Para descrever geometricamente as falhas inclinadas define-se o bloco superior ao plano da falha como capa ou teto, e o bloco inferior como lapa ou muro (Figura 16). Desta forma, quando a capa é rebaixada em relação à lapa, tem-se uma falha normal. Caso contrário, onde a capa é soerguida em relação a lapa, há uma falha reversa. Já na falha transcorrente, o movimento é lateral, ou seja, no sentido do plano horizontal. As falhas transcorrentes podem ter rejeito sinistral (lateral esquerdo) ou dextral (lateral direito), que vem do latim (*sinister* = esquerda, *dexter* = direita).

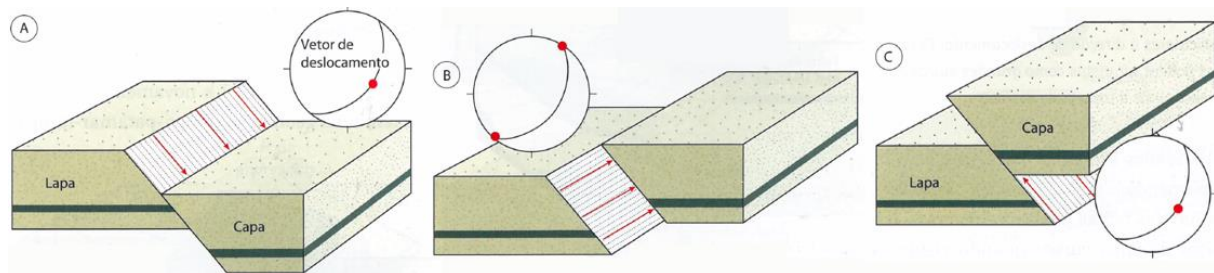


Figura 16 - Falhas normal (A), transcorrente (sinistral) (B) e reversa (C). Esses são os membros extremos, mas há um espectro contínuo de falhas oblíquas. Os estereogramas mostram o plano de falhas (grande círculo) e o vetor de deslocamento (ponto vermelho).
Fonte: Adaptado de Fossen (2012, p. 205).

1.6.2. Permeabilidade em Zona de Falha

No estudo realizado por Pena *et al.* (2019), a interpretação de lineamentos regionais possibilitou correlação entre essas morfoestruturas e a produtividade de poços tubulares, em ambiente cárstico. Com as análises apresentadas, os autores concluíram que os lineamentos com maior potencial hídrico são os de azimuth concordante ao fluxo do rio presente no local de estudo.

Assim como Pena *et al.* (2019) realizaram estudo do potencial hídrico em ambiente de cárste, Ribeiro *et al.* (2019) na Formação Lagoa Santa, onde interpretaram o fluxo hídrico em um aquífero de mesmo contexto geológico, ou seja o caimento para o sentido do Rio das Velhas. Da mesma forma, concluiu-se que as principais estruturas regionais coincidem com paleocondutos e o fluxo atual da água no aquífero estudado (Figura 17).

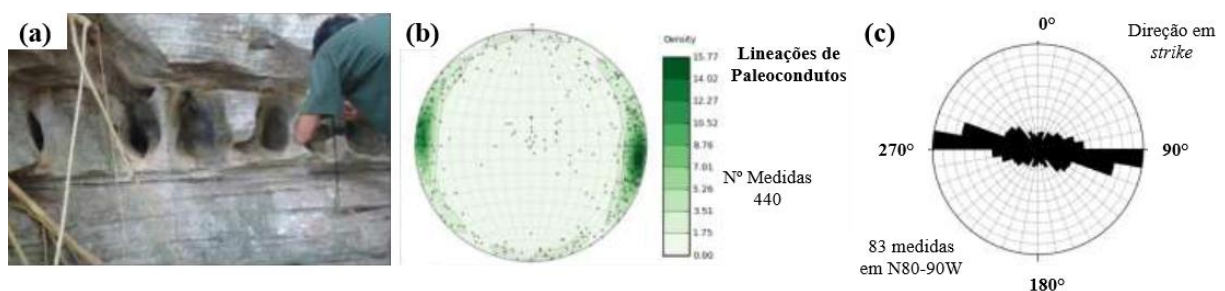


Figura 17 - Paleocondutos formados por dissolução. (b) Estereograma das fraturas associadas aos paleocondutos. (c) Diagrama de rosetas dos lineamentos de paleocondutos.
Fonte: Adaptado de Ribeiro *et al.*, 2019.

1.6.3. Análise Estrutural em Manto de Intemperismo

No trabalho de Monticelli (2019), foram feitas análises para determinar as causas de instabilidade no Túnel de Monte Seco, na ferrovia que liga Belo Horizonte/MG a Vitória/ES,

através da comparação entre os principais lineamentos em escala regional, e o mapeamento geológico-estrutural em escala local no manto de intemperismo, no qual foi possível compreender que o *trend* principal é o mesmo (Figura 18). A descrição geológica dos furos de sondagem, associada aos dados de eletrorresistividade, permitiram interpretar 03 horizontes de intemperismo distintos (I: solo transportado, II: maciço rochoso muito intemperizado e III: maciço rochoso Semi-Intemperizada), confirmados após mapeamento na área de estudo (Figura 19).

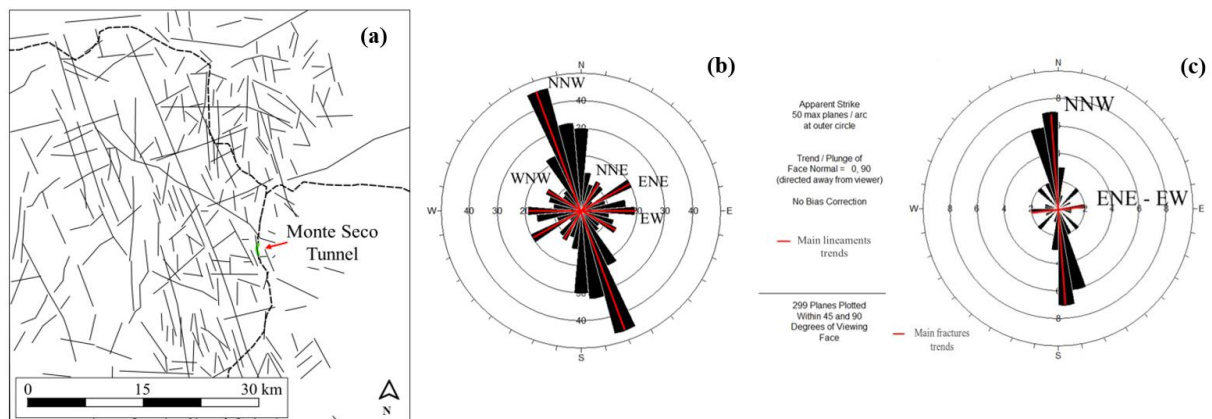


Figura 18 - (a) Localização da área de estudo e os principais lineamentos na região. (b) *Trend* principal dos lineamentos regionais. (c) *Trend* principal das fraturas locais.

Fonte: Adaptado de Monticelli, 2019.

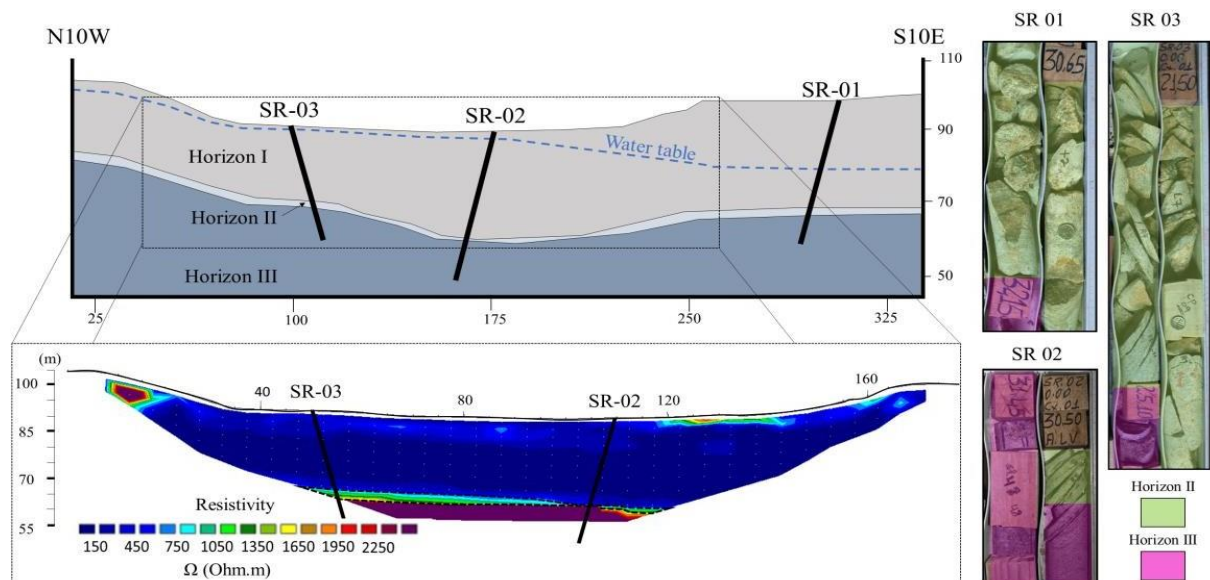


Figura 19 - Perfil geotécnico, perfil geolétrico correspondente e furos de sondagens ilustrando os diferentes horizontes de intemperismo.

Fonte: Monticelli, 2019.

Ao final, foi realizado agrupamento das principais famílias de fraturas (F1, F2 e F3), correlacionadas com grau de intemperismo (*Figura 20*). Essas famílias implicam no grau de fraturamento, percolação de água e, conseqüentemente, variação na estabilidade. As análises geológico-geotécnicas apresentadas por Monticelli (2019) tem metodologia semelhante à apresentada nesse trabalho, com a diferença da aplicação do estudo em cava.

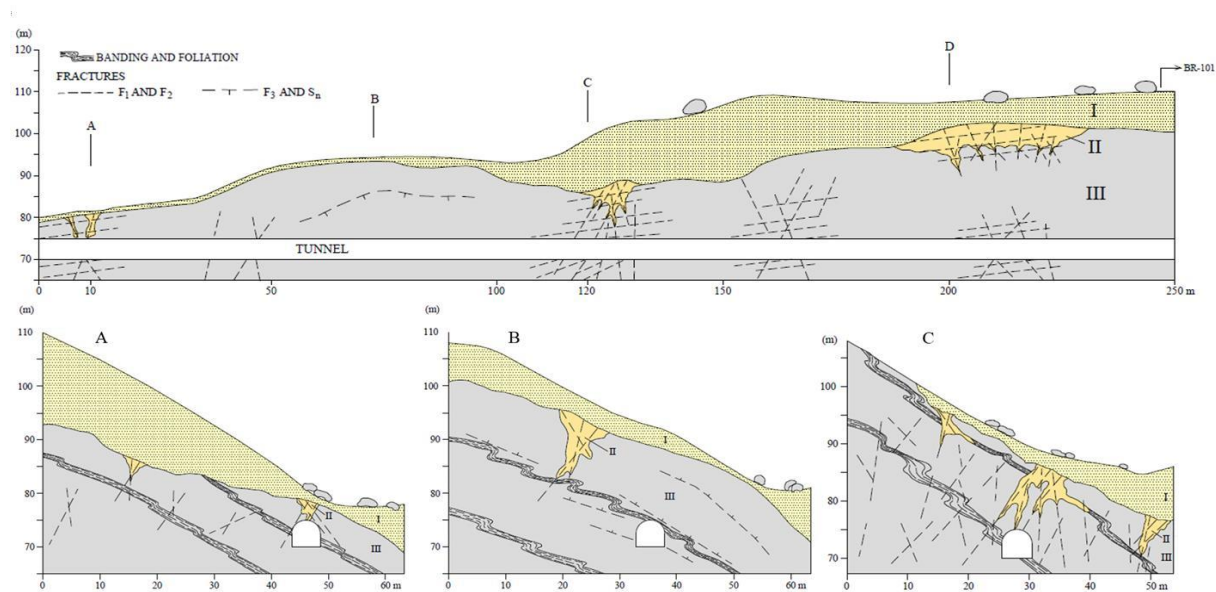
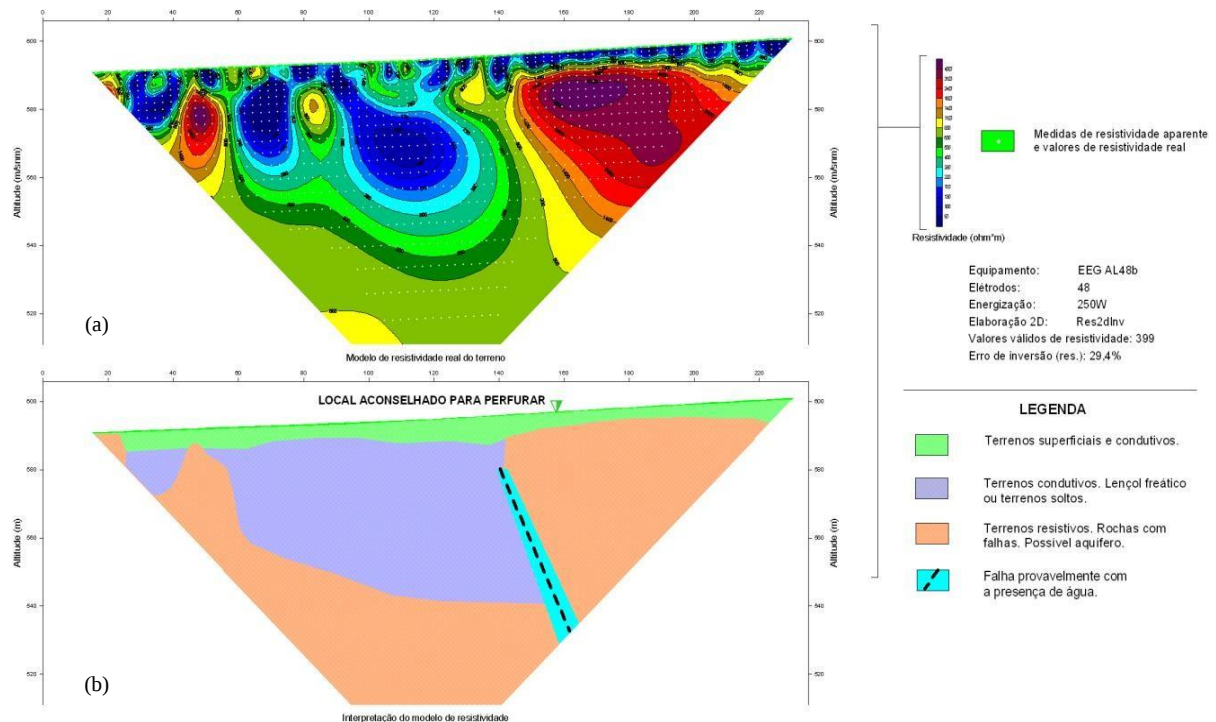


Figura 20 - Seções interpretadas, indicando os horizontes de intemperismo (I: solo transportado, II: maciço rochoso muito intemperizado e III: maciço rochoso Semi-Intemperizada), as famílias de fraturas (F1, F2 e F3) e a localização do túnel estudado.

Fonte: Monticelli, 2019.

A aplicação de eletrorresistividade permite geração de imagens 2D em subsuperfície, através do contraste entre as diferentes respostas de resistividade que cada material possui. Um dos objetivos com esse tipo de análise é a locação de poços tubulares, com a aplicação de geofísica para interpretar ocorrência de fraquezas no substrato rochoso e, conseqüentemente, a presença de aquíferos cristalinos (SÁ & ELIS, 2016).

A partir de um modelo de resistividade em subsuperfície é possível avaliar as mudanças na resistividade, definindo as zonas mais condutivas compatíveis com a presença de elevada saturação ou material solto preenchendo falhas, permitindo interpretar a geologia do perfil naquele local (*Figura 21*). A confirmação da presença de água nessas zonas se dá com a perfuração de poços nos locais indicados e confirmação de sua viabilidade através de testes de vazão (SÁ & ELIS, 2016).



O trabalho de Sá & Elis (2016) também ressalta a importância de combinar dados geofísicos, com informações geológicas do local. Apenas a análise geofísica permite diversas interpretações, que tendem a ser mais assertivas quando associadas ao conhecimento geológico, por exemplo, informações retiradas da descrição geológica de testemunhos de sondagem.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 Província Ígnea do Alto Paranaíba

Bebedouritos são rochas presentes em todos os complexos carbonatitos da Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) muito frequentes em complexos carbonatíticos e foscoríticos de afiliação ultrapotássica. É também o hospedeiro primário de mineralização de fosfato importante, como ocorre em outros Complexos Alcalinos (BROD *et al.*, 2004).

Em alguns complexos da PIAP, como Catalão I e Araxá, bebedouritos são fortemente convertidos em flogopitita metassomática por meio da interação com magma carbonatítico ou fluidos. Em outros casos, como Salitre e Tapira, grandes porções de bebedourito são preservadas da alteração metassomática, e amostras frescas estão disponíveis nos testemunhos (BARBSOSA, 2012).

Bebedouritos são rochas silicáticas presentes em complexos alcalinos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. Essas rochas são compostas por cumulos com presença de diopsídeo, olivina, perovskita, magnetita, apatita e magnetita em proporções modais variadas (NASCIMENTO, 2018)

Flogopititos abrangem rochas ígneas ou metassomáticas constituída por quantidades superiores a 50% de flogopita ou vermiculita, visíveis a olho nu (PRO-0920-000-007-01-06, 2020) Magnetititos são rochas maciças, de coloração escura, caracterizadas por quantidades de magnetita superiores a 50%. Comumente, além de magnetitas, são compostas de calcopirita, actinolita, hastingsita, quartzo, epidoto, apatita e proporções subordinadas de albita, calcita, clorita, titanita, ilmenita e pirita (SHIMIZU, 2012). Foscoritos são rochas plutônicas ricas em apatita, cuja composição mineralógica é dada por olivina, apatita e magnetita (NASCIMENTO, 2018). Nelsonitos também são rochas compostas por apatita e magnetita, sendo diferenciadas de foscoritos por não conter olivina (JÁCOMO, 2010). Ambas as rochas, quando submetidas ao intemperismo, formam magnetitito como resistatos. Na maioria dos casos não apresentam estruturas do protólito, possuem consistência friável, e são formadas basicamente por magnetita e argilominerais (PRO-0920-000-007-01-06, 2020). Quando submetidas às ações dos agentes intempéricos, as rochas de Salitre I são subdivididas em: Aloterito, Isalterito, Rocha Semi-Intemperizada e Rocha Sã (Figura 22).

Aloterito (ALO) é o material superficial resultante de um intemperismo suficientemente evoluído para destruir todas as estruturas da rocha fonte. Fisicamente, este intervalo é caracterizado por: diminuição do volume original da rocha mãe, destruição progressiva das feições de sustentação das estruturas da rocha, importância das remobilizações, e abundância do conteúdo de argila. Outros constituintes minerais encontrados são: goethita, quartzo, anatásio, fosfatos aluminosos da família da crandalita e florencita. A principal característica física é sua coloração vermelha (níveis superiores) e amarelo claro (níveis inferiores) associada a oxi-hidróxidos de ferro e pela sua constituição argilosa. Nesse horizonte não há apatitas, todo fósforo é fixado em minerais fosfáticos aluminosos da família das crandalitas (PRO-0920-000-007-01-06, 2020).

Isalterito (ISA) é o intervalo Saprolito Isalterítico posicionado imediatamente abaixo do Saprolito Aloterítico. Em parte dessa zona as apatitas perdem parte do Ca, mas ainda preservam sua identidade. No Isalterito há preservação parcial de texturas e estruturas da rocha sã, assim como algumas características químicas e mineralógicas relacionadas aos minerais mais resistentes ao intemperismo que podem ser mantidas ainda que parcialmente. Novos minerais

também são formados em decorrência da alteração intempérica (PRO-0920-000-007-01-06, 2020).

Rocha Semi-Intemperizada (RSI) está posicionada abaixo do Saprolito Isalterítico. Este é o intervalo do manto intempérico onde todas as estruturas da rocha ainda se encontram preservadas. Normalmente o topo deste intervalo inicia-se quando a rocha reage a ácido clorídrico a 10%. As características físicas deste intervalo variam conforme a composição do protólito (PRO-0920-000-007-01-06, 2020).

A Rocha Sã (RSA) não apresenta nenhum vestígio de alteração intempérica. Também pode ser chamada de rocha fresca (PRO-0920-000-007-01-06, 2020).

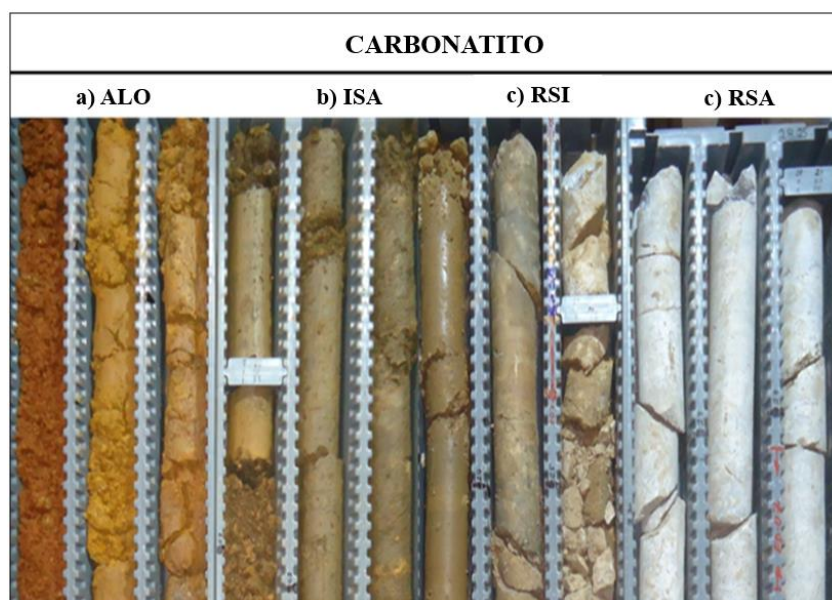


Figura 22 - Aspecto do manto de intemperismo no Carbonatito. a) ALO: Aloterito; b) ISA: Isalterito; c) RSI: Rocha Semi Intemperizada; d) Rocha Sã.

Fonte: Autor, 2024.

A região estudada insere-se no domínio da Faixa Brasília Meridional. A Faixa Brasília é uma unidade geotectônica situada na Província Tocantins, Brasil Central (DARDENNE, 2000), resultante da convergência e colisão de três grandes blocos continentais: Cráton Amazônico, Cráton São Francisco/Congo e Bloco Paraná. Tal faixa situa-se no limite da Província Tocantins com a borda oeste do Cráton São Francisco, com direção aproximadamente N-S e extensão de mais de 1000 km (DARDENNE, 2000; DARDENNE & SCHOBENHAUS, 2001). A Faixa Brasília Meridional compreende um conjunto de nappes de cavalgamento sub-horizontais, segmentadas por zonas de cisalhamento subverticais com direção noroeste.

A área de estudo está localizada no Complexo Alcalino-carbonatítico Salitre I, parte da Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP), que contém complexos alcalino-carbonatíticos intrusivos com mineralização de fosfato, sendo os principais depósitos fosfáticos do Brasil. Entre eles estão o Complexo do Barreiro em Araxá - MG, o Complexo de Tapira - MG, o Complexo Serra Negra e os Complexos Salitre I, II e III em Patrocínio - MG. Esses complexos são importantes depósitos de Fosfato, Nióbio, Titânio e elementos de Terras Raras. A Figura 23 mostra um mapa magnetométrico da região, destacando esses complexos (CODEMIG, 2004).

Segundo Moraes *et al.* (2008), a PIAP tem alinhamento geral NW-SE, coincidente com o Arco do Alto Paranaíba, que se desenvolveu sobre o cinturão orogênico conhecido como Faixa Brasília. A província ocupa a porção oeste-noroeste de Minas Gerais e sudeste de Goiás e configura a borda nordeste da Bacia do Paraná, sendo caracterizada pela distribuição de complexos alcalino-carbonatíticos, de *pipes* kimberlíticos e kamafugíticos, de intrusões ultramáficas e dos seus equivalentes associados a lavas e rochas piroclásticas do Grupo Mata da Corda.

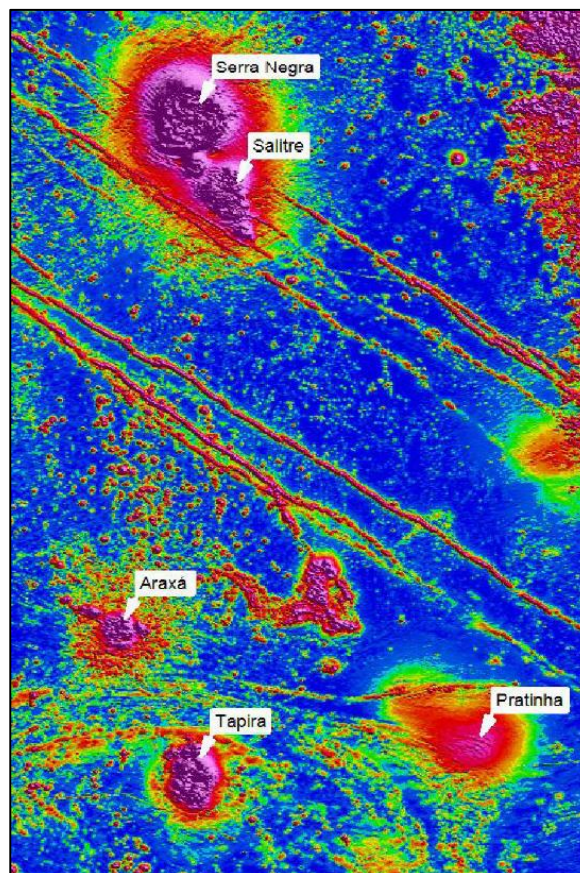


Figura 23 - Mapa magnetométrico de Patrocínio e Região. Os menores valores de magnetismo estão representados em azul e os maiores em rosa.

Fonte: Adaptado de CODEMIG, 2024.

As três intrusões distintas de Salitre I, II e III (Figura 30), cortam rochas pré-cambrianas de baixo grau de metamorfismo do Grupo Bambuí. Salitre I tem forma oval, com aproximadamente 7 km na direção N-S e 5 km na E-W. Já Salitre II é um pequeno *plug*, com área de 2,5 km², situado entre Salitre I e o complexo carbonatítico de Serra Negra. Um manto laterítico de até 100 m de espessura cobre as duas intrusões. Por sua vez, Salitre III é uma pequena intrusão com diâmetro de cerca de 2 km, situada ao sul de Salitre I (BROD *et al.*, 2004).

Segundo Brod *et al.* (2004) na região de Patrocínio existem quatro intrusões alcalinas distintas, de dimensões variadas (Serra Negra, Salitre I, II e III). As anomalias magnéticas dos complexos assim como a separação aproximada entre eles podem ser visualizadas na Figura 24.

As intrusões alcalinas dessa província foram datadas em cerca de 80 milhões de anos, por Amaral *et al.* (1967) e Hasui & Cordani (1968), portanto correspondendo ao Cretáceo Superior.

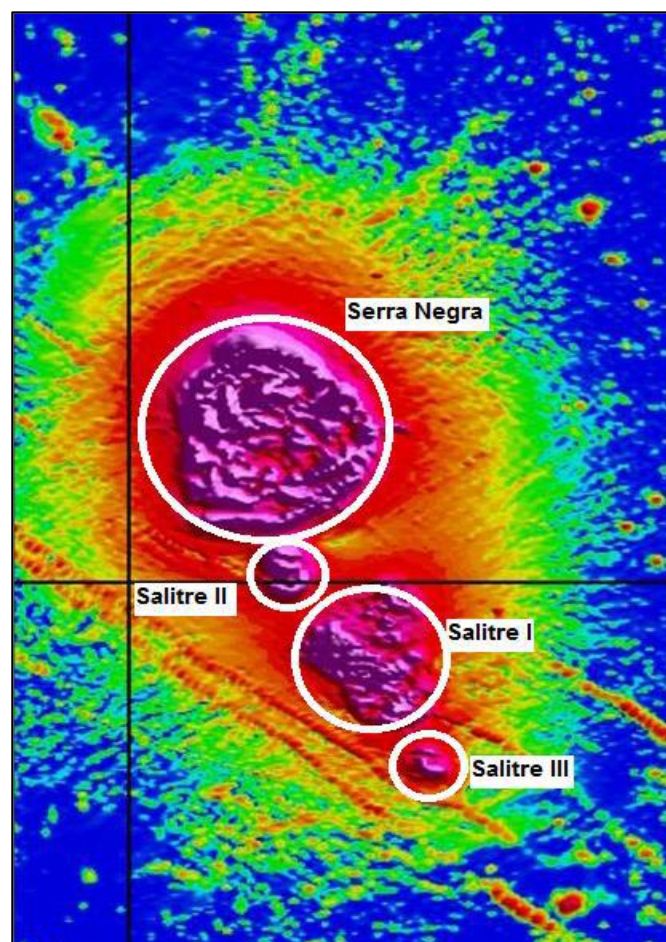


Figura 24 - Mapa magnetométrico dos complexos Salitre I, II, III e Serra Negra.
Fonte: Adaptado de CODEMIG.

2.2. Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre I

O Complexo Alcalino-Carbonatítico Salitre I compreende uma estrutura elipsoide alongada no eixo N-S e com dimensões aproximadas de 7x5 km, encaixada em folhelhos, ardósias, siltitos e quartzitos do Grupo Bambuí (Figura 25). Trata-se de um corpo alcalino ultramáfico-carbonatítico constituído principalmente por bebedouritos, carbonatitos e foscoritos (BARBOSA, 2012). É composto por pelo menos duas intrusões, uma ao norte, predominantemente bebedourítica com perovskita, associada a enxames de diques carbonatíticos e foscoríticos e, uma ao sul essencialmente bebedourítica (BARBOSA *et al.*, 2020).

As composições mineralógica, química e isotópica de bebedouritos, foscoritos e carbonatitos mostram que essas rochas estão associadas a uma complexa evolução magmática, que envolve múltiplos estágios, marcados por cristalização fracionada e imiscibilidade de líquidos (BARBOSA *et al.*, 2012).

Falhas radiais de pequeno rejeito recortam o anel quartzítico da borda do complexo. Tem-se ainda uma falha de direção NS no meio do complexo e falhas circulares, provocadas pela intrusão mais nova sobre as rochas mais antigas (GRPLP, 2019).

Na área da mineralização principal da jazida de Salitre ocorre uma área alagada, com cerca de 780.000 m² (1200 m x 650 m) e com vertente de desagendamento correndo para SW/S (córrego do Bebedouro) onde ocorre um expressivo depósito de turfa com espessura de até 130 metros.

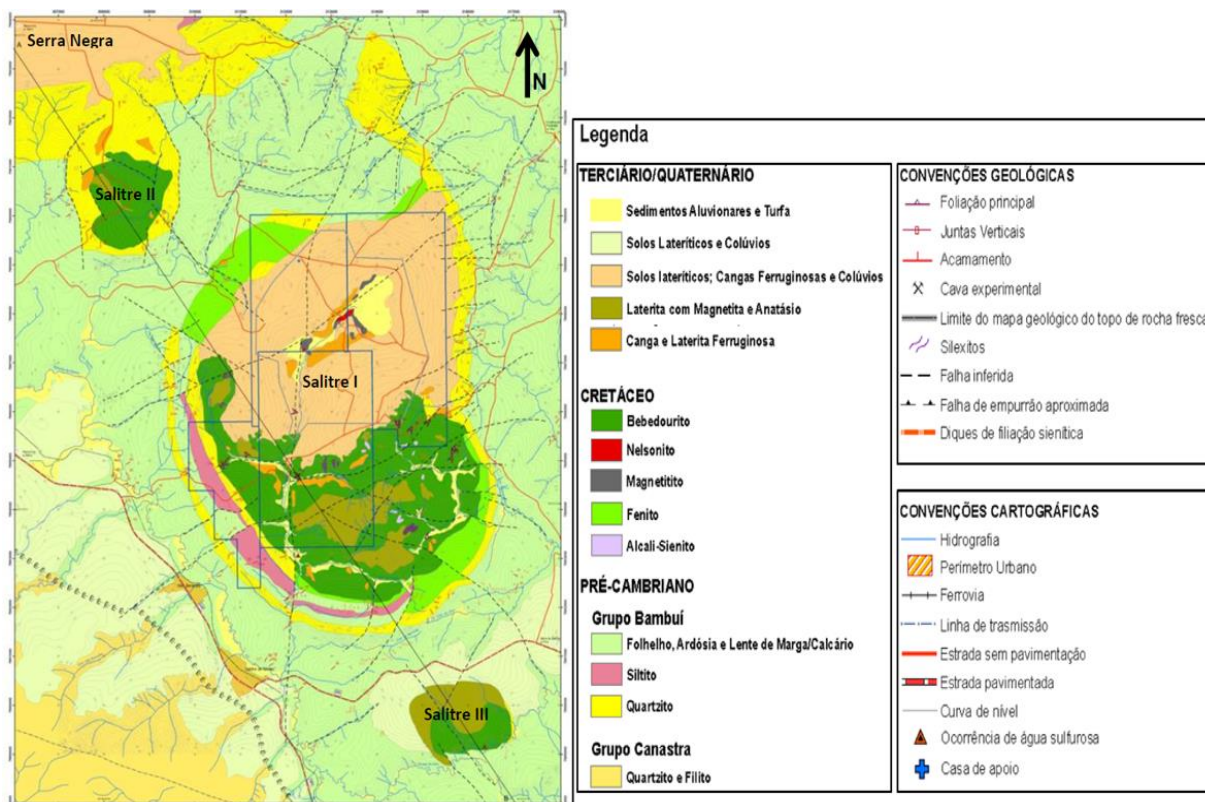


Figura 25 - Intrusão do Complexo Alcalino Salitre I, Patrocínio/MG.

Fonte: Chaban, 2001.

2.3. Geologia da Mina de Fosfato

O depósito de fosfato de Patrocínio foi formado pela alteração supergênica de bebedouritos, foscoritos e carbonatitos ricos em apatita. O processo de intemperismo extremo foi responsável pela concentração residual de apatita e está tipicamente relacionado à hidrólise parcial de minerais silicatados e dissolução de carbonatos, com perda geral de Ca, Mg, K e Si, e acúmulo de Al, Fe e Ti, da base ao topo (ANNUAL REPORT, 2020).

Essa alteração das rochas dá origem aos horizontes de intemperismo, cuja classificação da zona mineralizada passou por revisão em 2018, na qual o Isalterito passou a ser dividido em Oxidado, Micáceo de Topo e Micáceo de Base.

Na superfície natural do terreno, os principais horizontes de intemperismo expostos na área da mina são Cobertura e Aloterito (Figura 26). Já em profundidade, observa-se a presença dos demais horizontes de intemperismo em ordem decrescente quanto ao grau de alteração: Oxidado Micáceo de Topo; Micáceo de Base, Rocha Alterada e Rocha Fresca (Figura 27).

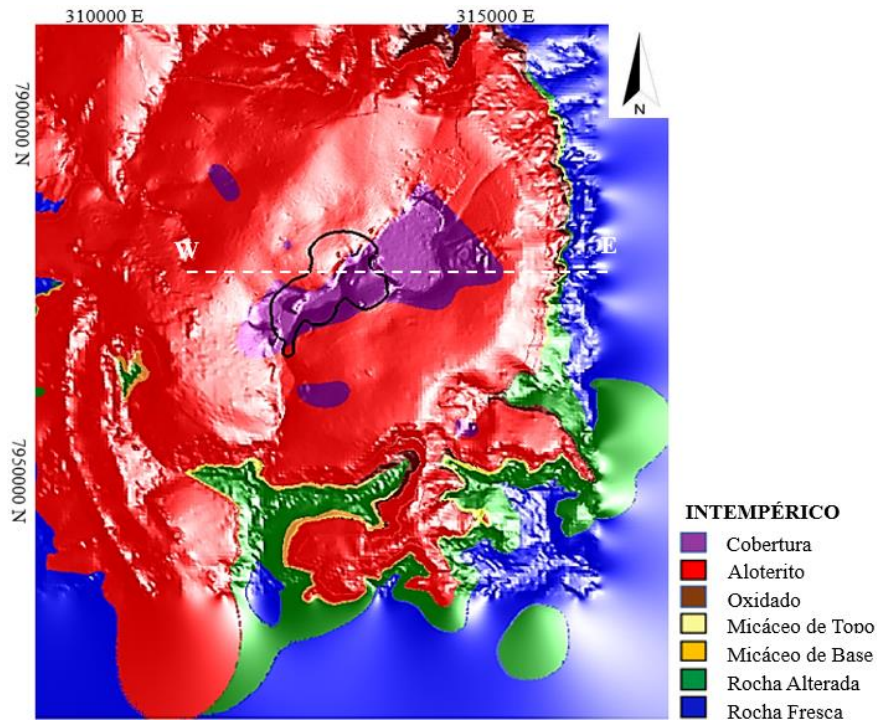


Figura 26 - Visão geral do modelo de intemperismo.

Fonte: Adaptado de Technical Report on the Mineral Resources Estimates (2020).

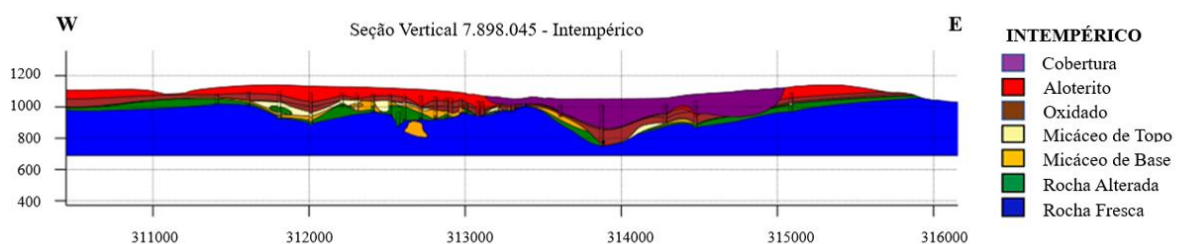


Figura 27 - Seção transversal típica do modelo de intemperismo.

Fonte: Adaptado de Technical Report on the Mineral Resources Estimates (2020).

Na superfície natural, os principais depósitos são de turfa e argila (Figura 28). Em profundidade ocorrem com mais frequência as litologias Bebedourito e Carbonatito (Figura 29).

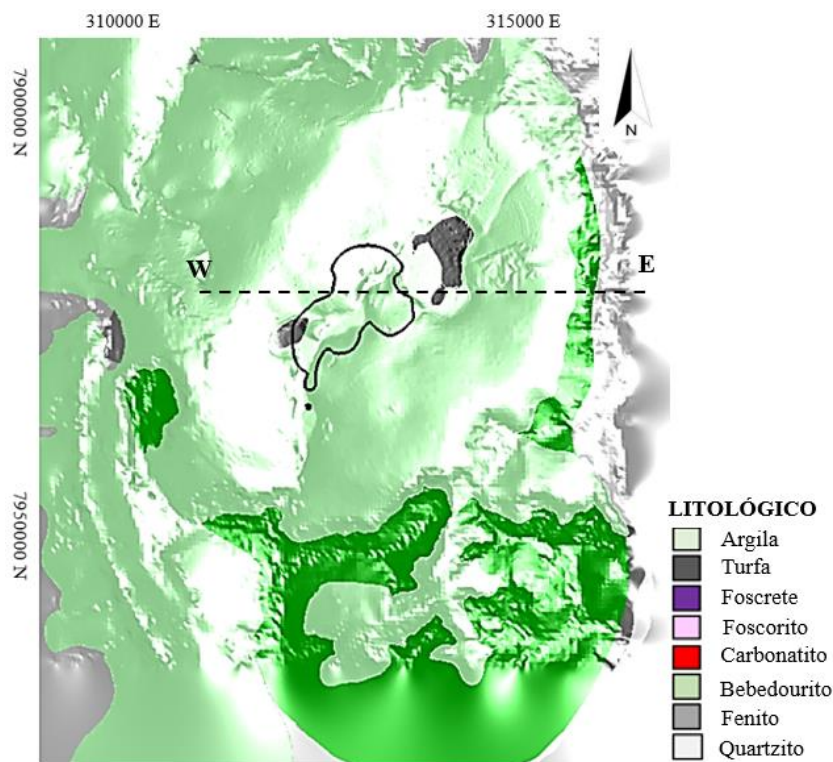


Figura 28 - Visão geral do modelo litológico.

Fonte: Adaptado de Technical Report on the Mineral Resources Estimates (2020).

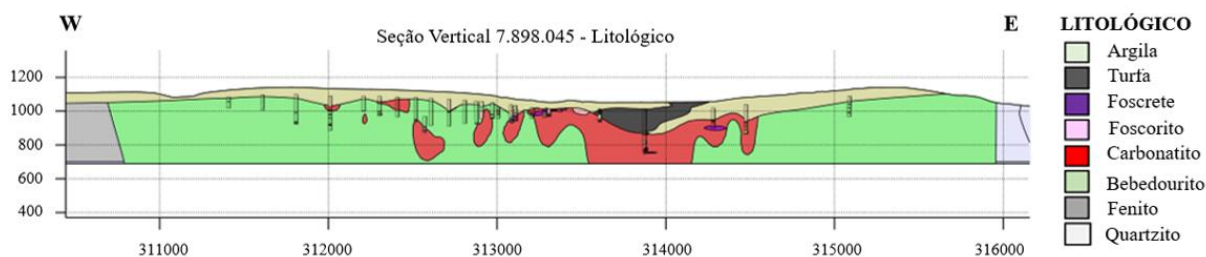


Figura 29 - Seção transversal típica do modelo litológico

Fonte: Adaptado de Technical Report on the Mineral Resources Estimates (2020).

O desenvolvimento da Mina de Patrocínio expôs os horizontes de intemperismo. O mapeamento realizado na área da cava, mostra a presença de aloterito em cota superiores e, à medida que se aprofunda, há redução do grau de intemperismo, expondo os materiais referentes aos horizontes oxidado, micáceo (topo e base representados juntos), rocha alterada e rocha fresca (Figura 30).

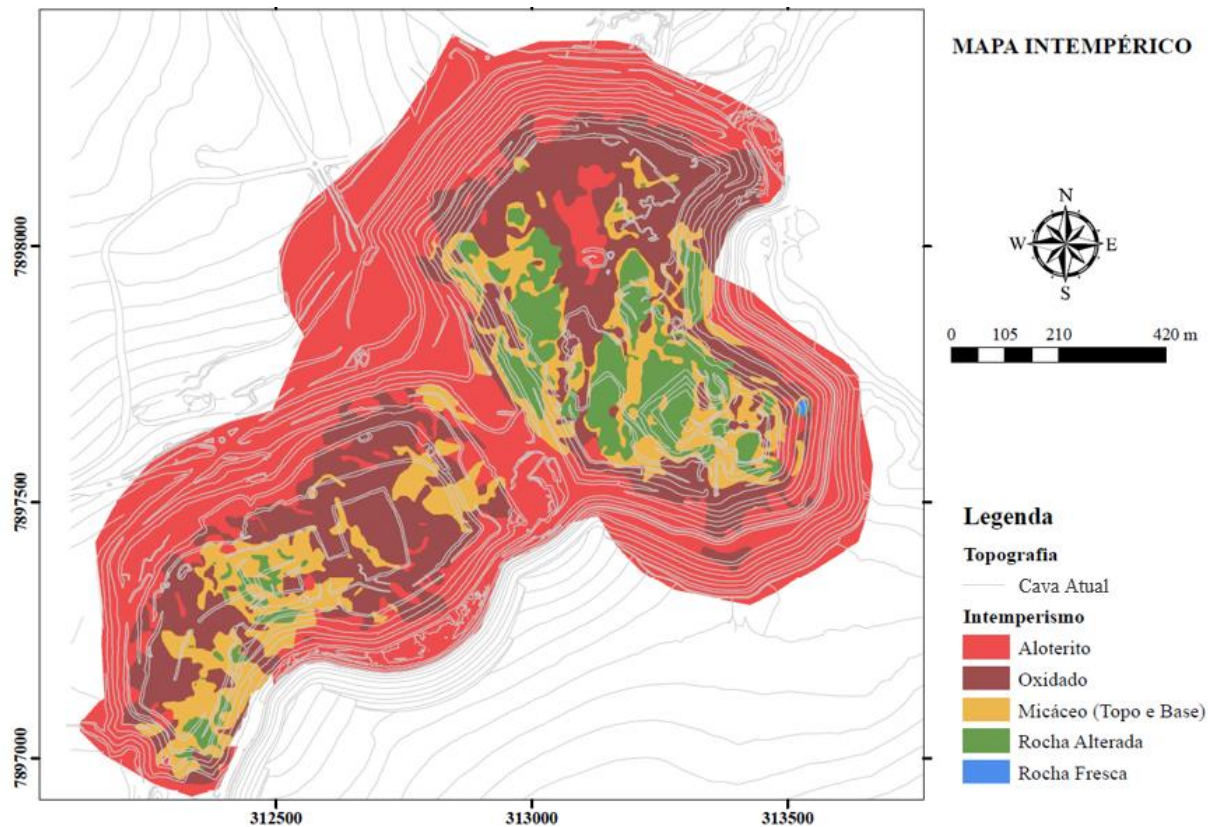


Figura 30 - Mapa de intemperismo da condição atual da mina.

Fonte: Autor, 2024.

Da mesma forma que a evolução da mina expõe os diferentes horizontes de intemperismo, há também exposição das litologias observadas em subsuperfície. Com o mapeamento de frente de lavra, é possível observar a presença da Cobertura, um material que agrupa argila e aloterito, cujo detalhamento não foi realizado em função do não aproveitamento econômico do mesmo. Além desse material, também são mapeados Canga, Turfa, Bebedourito e Carbonatito (Figura 31).

Nota-se que há uma maior concentração do Carbonatito na região leste da mina. À medida que seguimos para oeste o carbonatito aparece como intrusões menores no bebedourito.

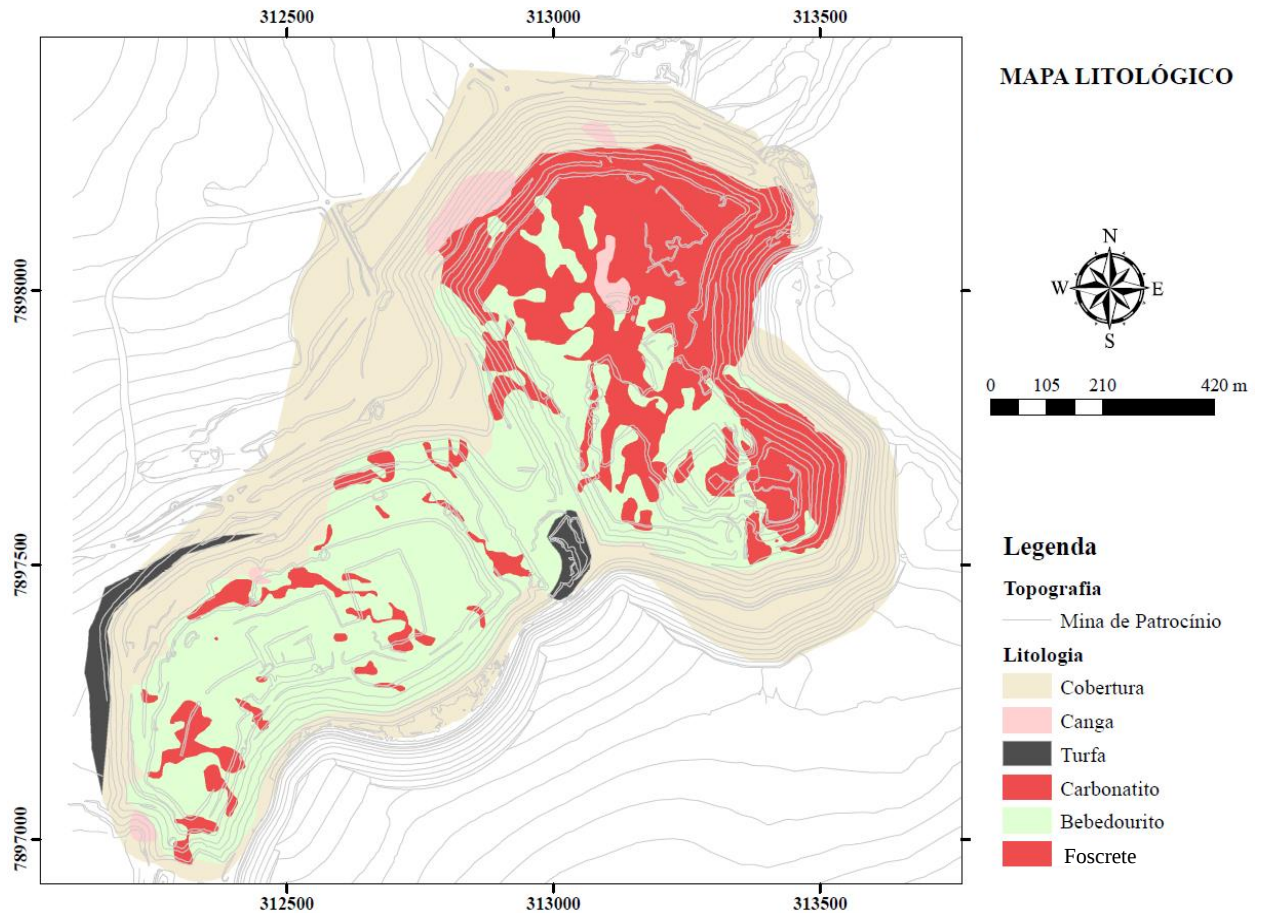


Figura 31 - Mapa da litologia da condição atual da mina.
Fonte: Autor, 2024.

2.4. Arcabouço Tectônico Regional

Hasui (2007) realizou análises estruturais na região de Salitre I, utilizando imagens de satélite, mapas topográficos e dados de furos de sondagem, uma vez que levantamentos diretos foram impossibilitados pela espessura do manto de intemperismo e pela falta de fraturas na superfície. A análise de imagem de satélite revelou fraturas nos padrões NW-SE, NE-SW, W-E e N-S, em ordem decrescente (Figura 32).



Figura 32 - Lineamentos em Salitre I e seu entorno.
Fonte: Adaptado de Hasui, 2007.

Quanto a extração de lineamentos por mapas topográficos, Hasui considerou os trechos retilíneos de vales e quebras de relevo com extensão considerável como lineamentos de falhas (Figura 33). Direções similares aos encontrados na análise da imagem de satélite (Figura 34) podem ser notados facilmente.

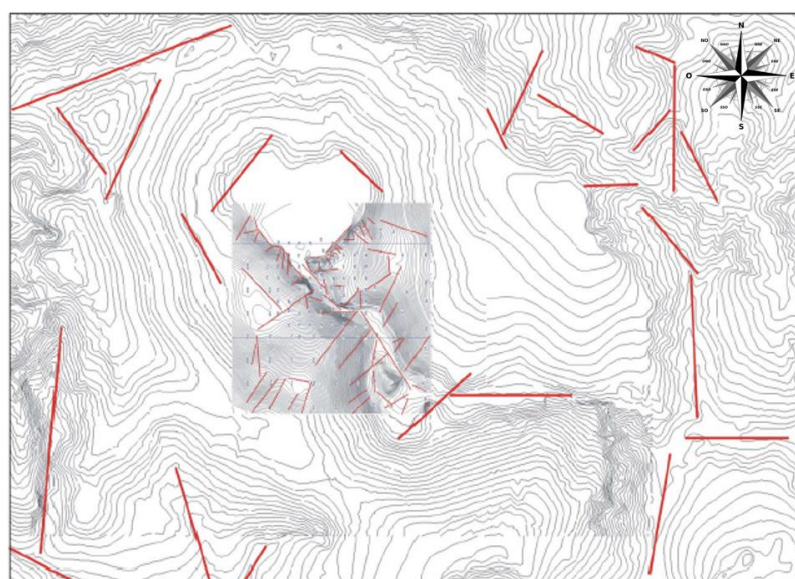


Figura 33 - Análise dos possíveis padrões de fraturamento determinados com base na topografia.
Fonte: Adaptado de Hasui, 2007.

Por fim, foi realizada uma análise de subsuperfície com base em furos de sondagem rotativa em seções E-W e N-S. Nesta fase foram demarcadas profundidades específicas de rocha, na qual mudanças bruscas na profundidade onde estas camadas de rochas são encontradas podem ser indicativos de elementos estruturais na área do projeto (Figura 34).

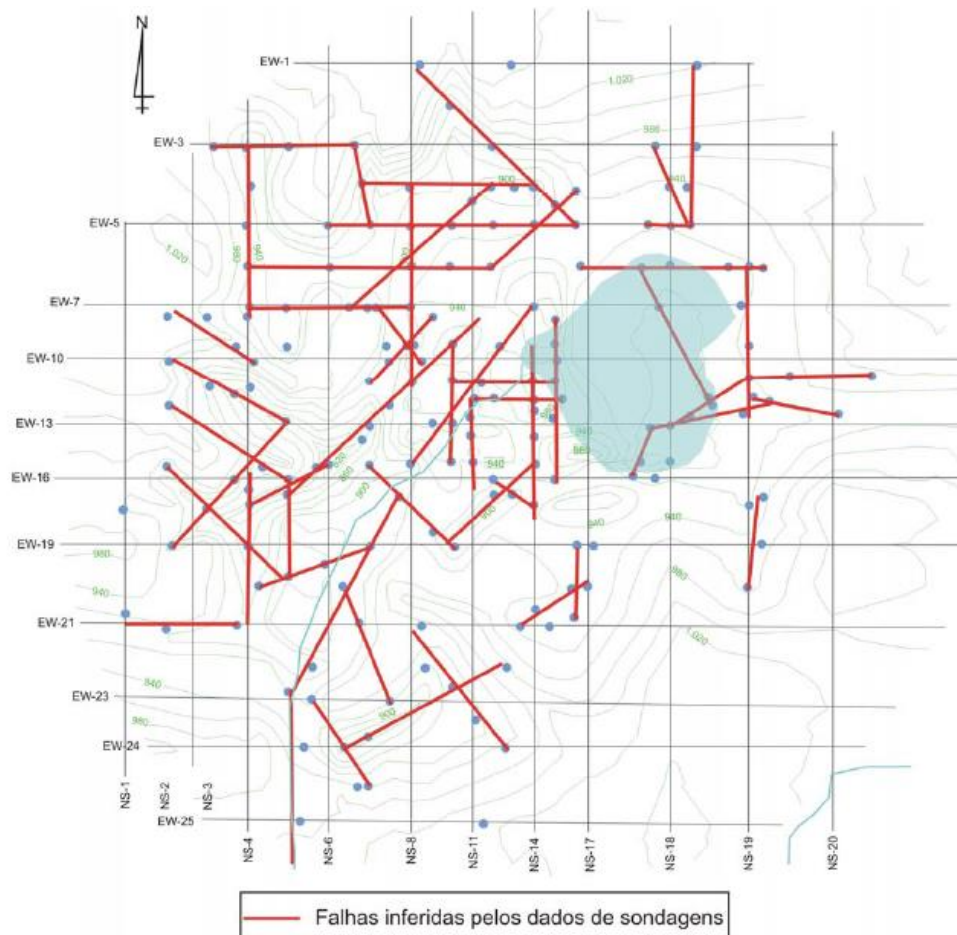


Figura 34 - Traços de falhas obtidos pela ligação de três ou mais pontos próximos obtidos das seções EW e NS.

Fonte: Hasui, 2007.

Posteriormente, em 2009, Hasui criou um modelo geológico da bacia sedimentar da área da jazida do Projeto Salitre com base nos dados de 2007 cuja interpretação das estruturas (Figura 35) é dada por: traços em preto representam falhas sugeridas pelo autor, em verde os limites de setores indicados pela eletrorresistividade e em roxo são falhas marginais delimitando as zonas de maior espessura de sedimentos.

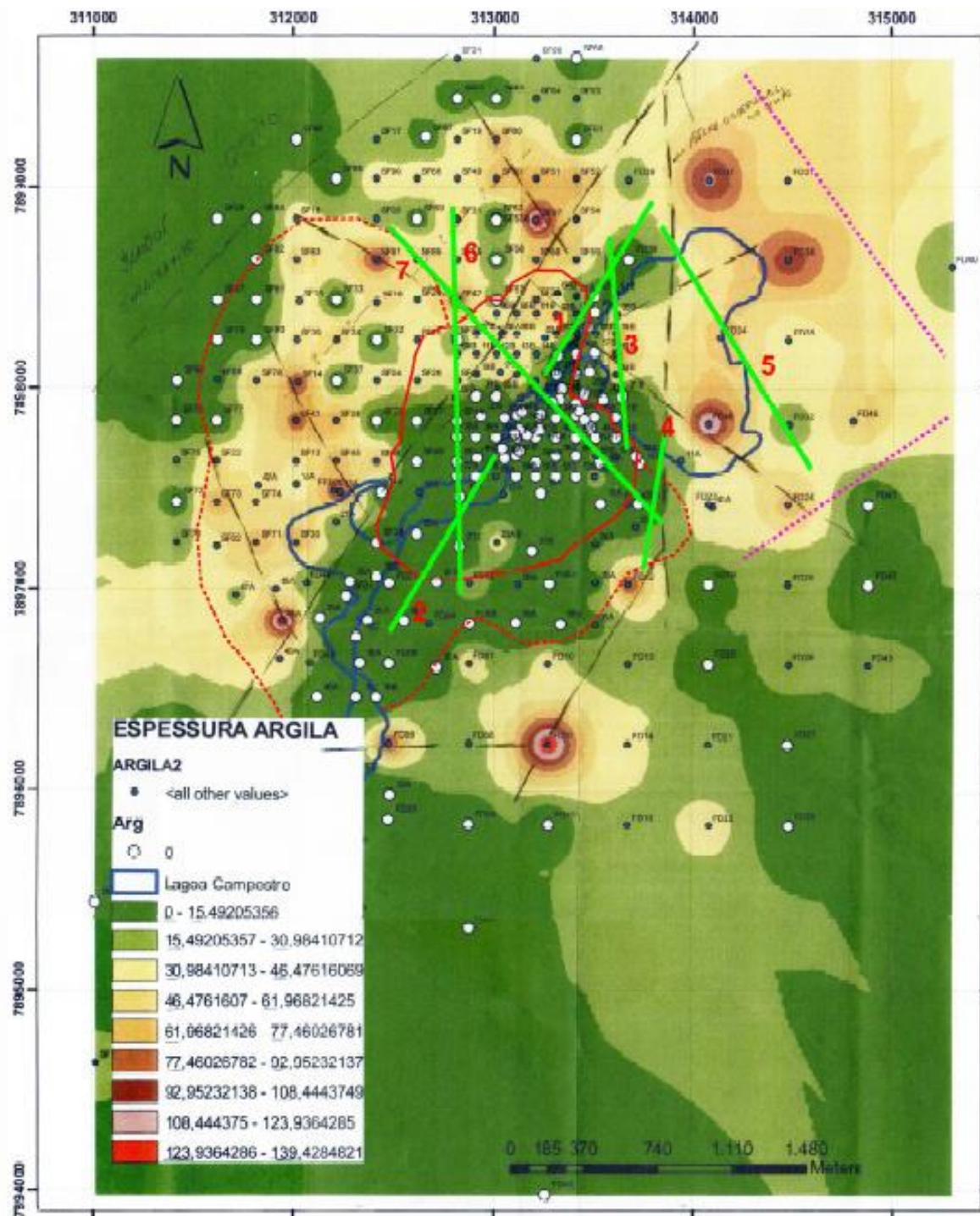


Figura 35 - Mapa de espessuras de “argilas”, elaborado por N. Chaban. Traços em preto: falhas sugeridas pelo autor. Em verde: limites de setores indicados pela eletorresistividade. Em roxo: falhas marginais delimitando as zonas de maior espessura de sedimentos.

Fonte: Chaban, 2009.

Com base na topografia da base das “argilas” Hassui interpretou que os centros de deposição (depocentros) aparecem esparsamente, com flancos assimétricos indicativos da presença de falhas. Na figura 43 são delimitadas todas as falhas e os limites de setores indicados pela eletrorresistividade, na qual o canal de fuga da Área Alagável, de cor azul no mapa, é controlado por uma falha de direção NE-SW indicada pelo mapa de isópacas, e coincide com um limite de setores apontado pela eletrorresistividade.

Através das falhas traçadas por imagens de satélite (Figura 32), topografia (Figura 33), topo rochoso (Figura 34) e espessura de argila (Figura 35), Hassui interpreta que há presença de importantes estruturas com direções NE-SW e NW-SE (Figura 36).

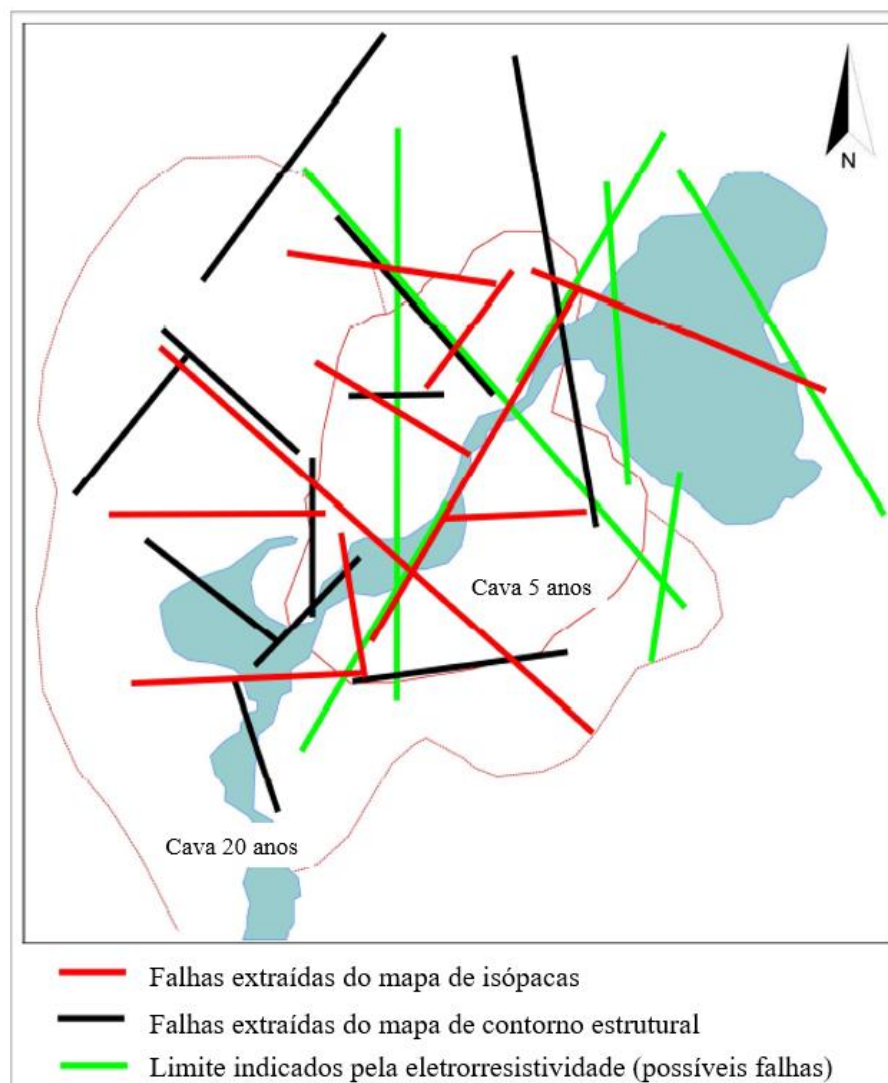


Figura 36 - Representação sintética das falhas indicadas nas Figura 31 a 34.
Fonte: Hassui (2009).

Da mesma forma que Hasui, no trabalho de Borges (2018), foram analisadas estruturas por meio de sensoriamento remoto, cujas direções de maior frequência em escala regional possuem orientação NW-SE, concordante ao alinhamento das intrusões ígneas de Serra Negra, Salitre I, II e III (Figura 37).

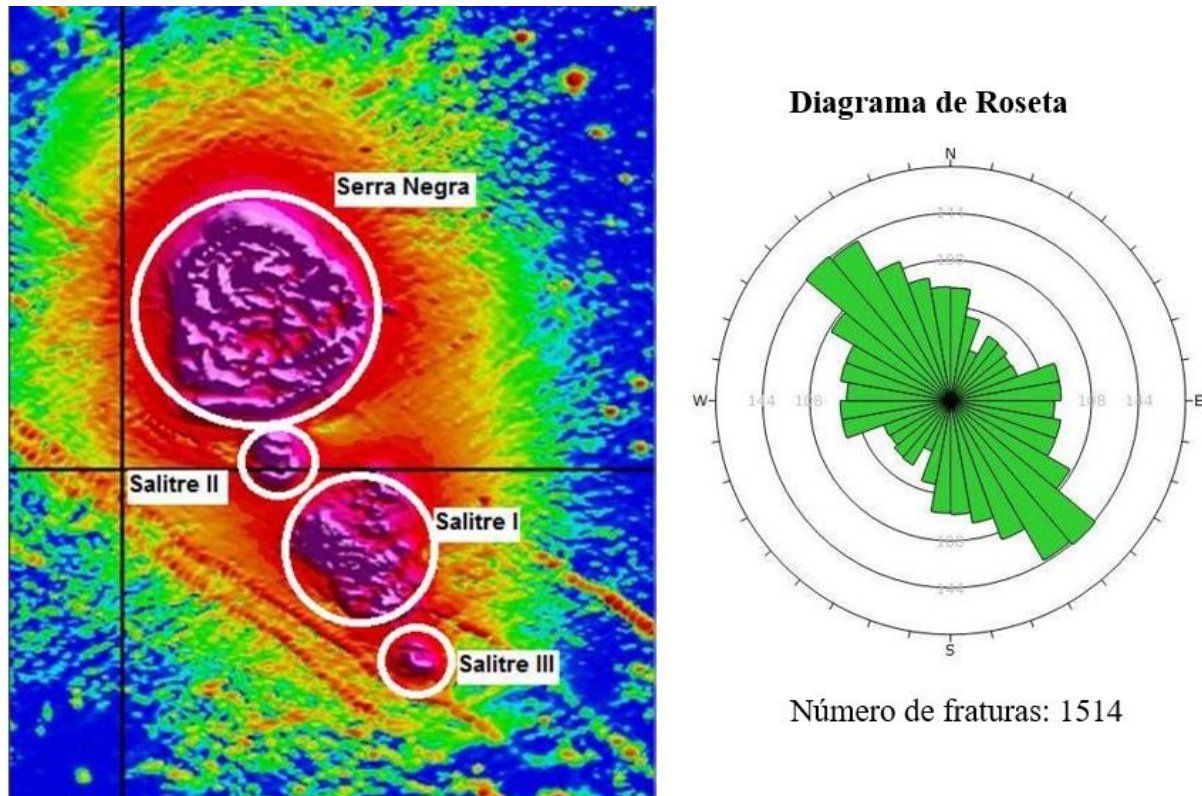


Figura 37 - Mapa geofísico dos complexos da região de Patrocínio e diagrama de roseta da área com sensoriamento remoto.
Fonte: Adaptado de Borges (2018).

Através do levantamento de campo, Borges (2018) identifica que, assim como as estruturas NW são de relevância regional, estruturas NE-SW também são de grande importância (Figura 38). Essas estruturas apresentam elevados ângulos de mergulho, sendo as de direção NE mais frequentes, indicando uma maior influência na atividade tectônica local.

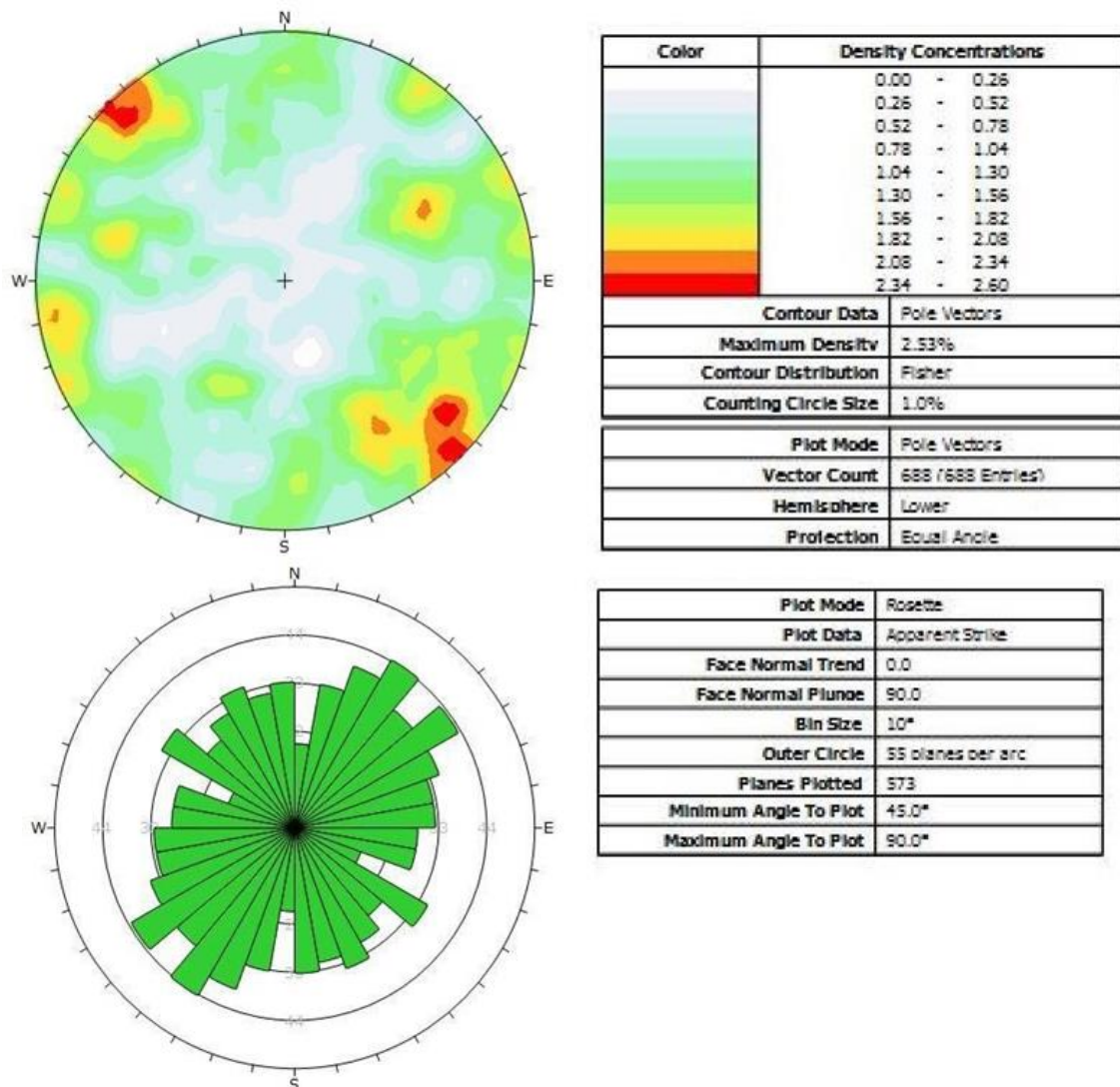


Figura 38 - Estereograma e Diagrama de roseta compostos por todos os dados levantados em campo.

Fonte: Borges (2018).

Borges (2018) conclui que, de forma geral, as estruturas mais relevantes presentes em Salitre I, são de direção NW e NE (*Figura 39*).

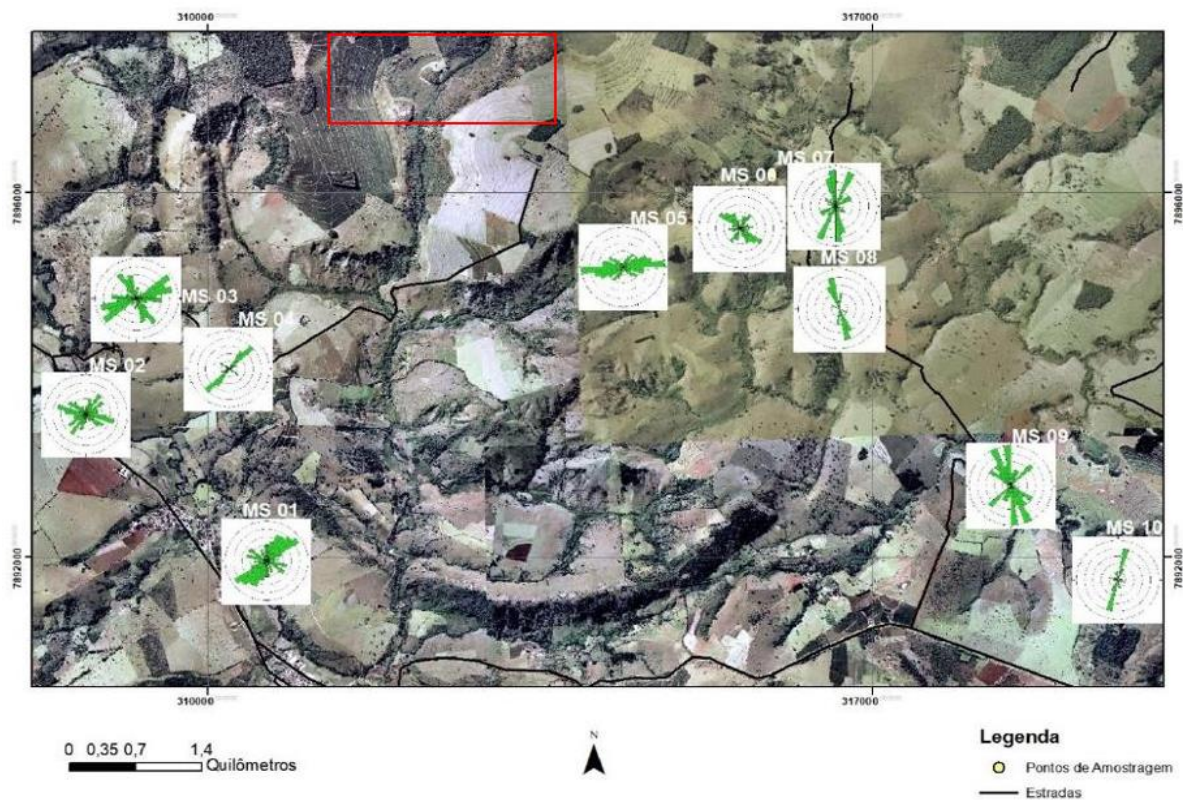


Figura 39 - Mapa com diagramas de roseta em sua posição geográfica.

Fonte: Borges (2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Mapeamento de Trincas em Campo e a Correlação o Levantamento Geofísico

Em julho de 2018 durante o mapeamento geológico-geotécnico das cavas para a atualização dos mapas e do estudo de estabilidade dos taludes da mina, foram encontradas algumas trincas que abrangeram a região do afloramento de magnetitito (Figura 40).

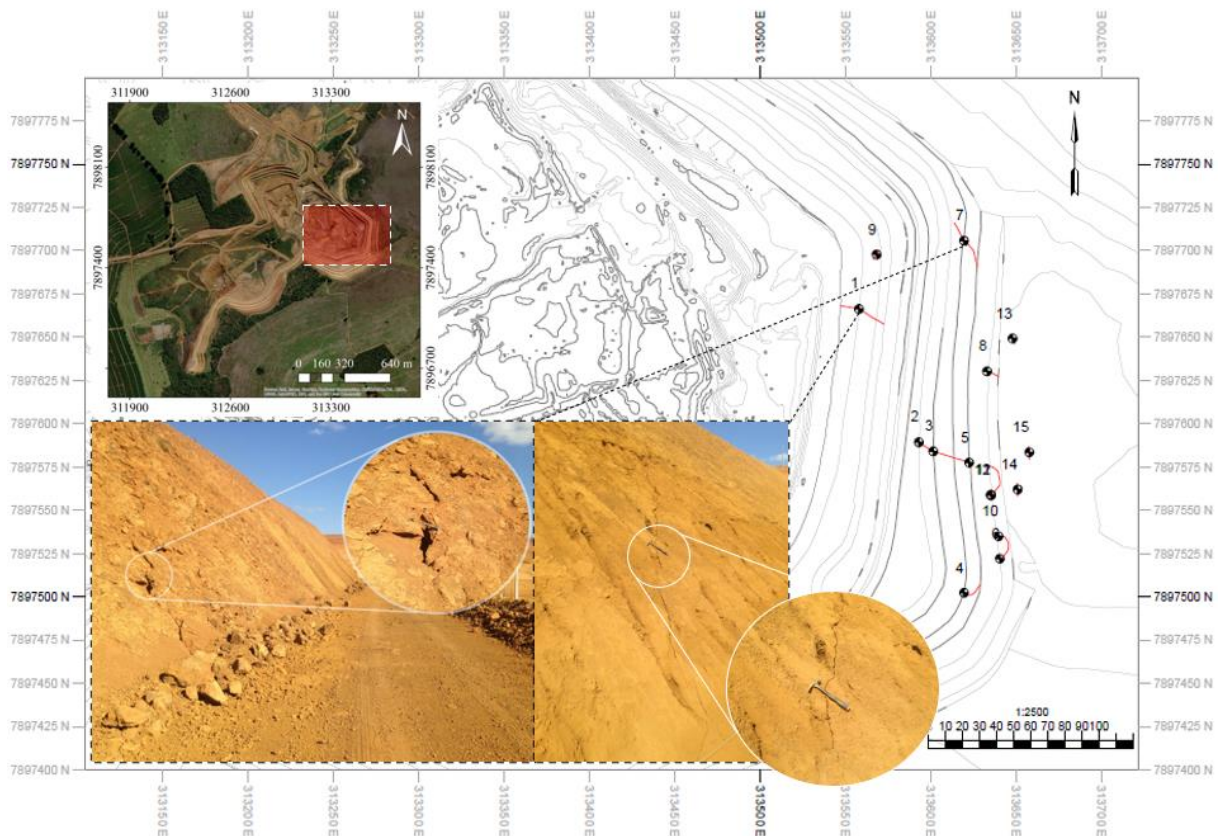


Figura 40 - Detalhe do mapeamento das trincas na Cava Leste e da abrangência da trinca no talude da elevação 1120m.

Fonte: Adaptado do relatório CMP18MNRT02-R2, 2018.

Como forma de correlacionar as trincas ocorridas na Cava Leste com possíveis lineamentos ou zona de baixa resistência, foram utilizados furos de sondagem rotativa disponibilizados pela mineradora e inseridos no contexto das aquisições geofísicas. Essas investigações encontram-se localizadas próximas às seções de eletroresistividade L-07, L-08 e L-10, (Figura 41) sendo denominadas por CMP-18-DH-00100, CMP-18-DH-00101 e CMP-18-DH-00102, respectivamente. Nota-se pela descrição das mesmas, a presença de 03 (três) litotipos característicos da região, representados por: carbonatitos (CBN), magnetitos (MGN) e foscrete (FET).

Segundo a Neogeo Geotecnologia LTDA (2018), os perfis de eletroresistividade permitiram a análise geofísica em profundidades de até 50 metros, aproximadamente. Os dados levantados foram consistentes na diferenciação das anomalias de resistividades altas, baixas e intermediárias (Figura 41). As análises das seções geofísicas consideraram a diferenciação dos perfis em virtude da sua magnitude em Zonas de Alta Resistividade aparente (ZAR), cujos valores encontram-se acima de 2.706 ohm.m e Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR), cujos valores estão abaixo de 733 ohm.m, aproximadamente. Magnitudes

intermediárias para o parâmetro em questão foram associadas a Zonas de Resistividade Intermediária (ZIR).

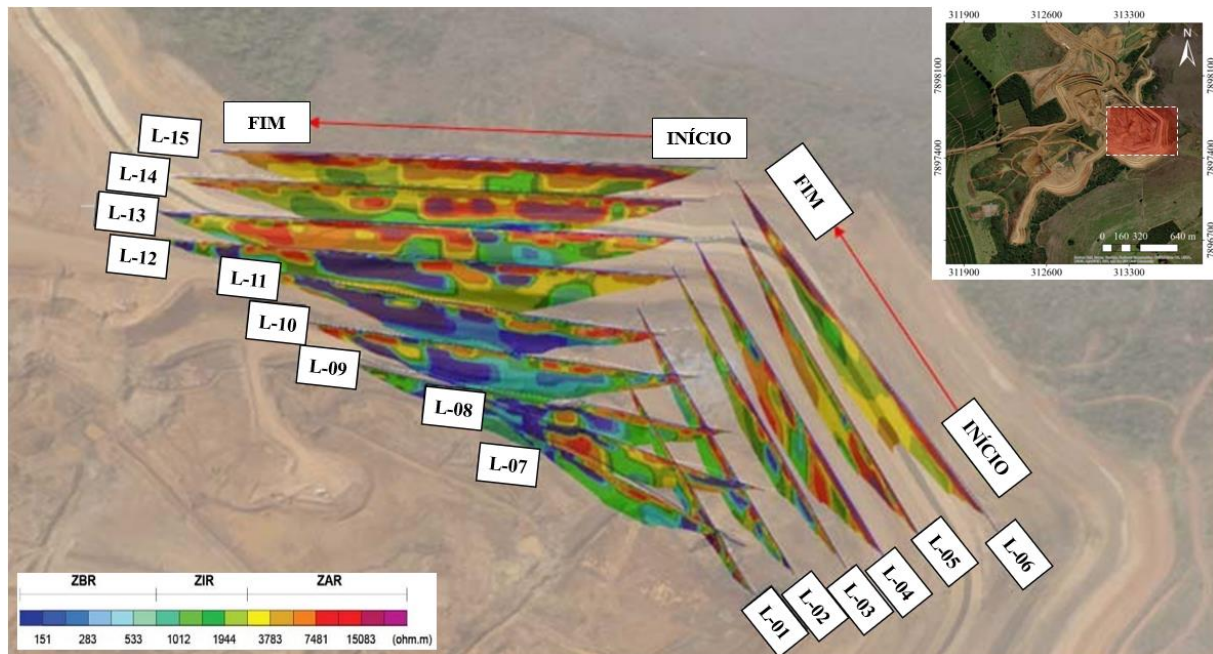


Figura 41 - Seções de Eletroresistividade (CE) no contexto da Cava Leste.

Fonte: Adaptado de Neogeo Geotecnologia LTDA, 2018.

A partir do volume fornecido pela equipe técnica da mineradora, gerado pelas informações contidas em furos de perfuratriz, notou-se que o mesmo se insere no contexto de anomalias predominantemente condutivas (Figura 42 e Figura 43), nas seções de Eletroresistividade (CE). Por meio do cruzamento dos dados das seções elétricas com os dos furos de perfuratriz, notou-se que as variações de resistividades aparentes com intervalos entre 300 ohm.m e 550 ohm.m (Figura 42), caracterizadas no item anterior (1.6.2 da Revisão Biliográfica), como Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR's), correlacionam-se com os intervalos de materiais friáveis contidos nos furos de perfuratriz (Figura 43). Entende-se, portanto, que tais anomalias podem estar possivelmente associadas a regiões que estão relacionadas à quantidade de íons e sais dissolvidos em água com presença de material de baixa resistência mecânica (e.g. magnetitito friável) e/ou fortemente alterado.

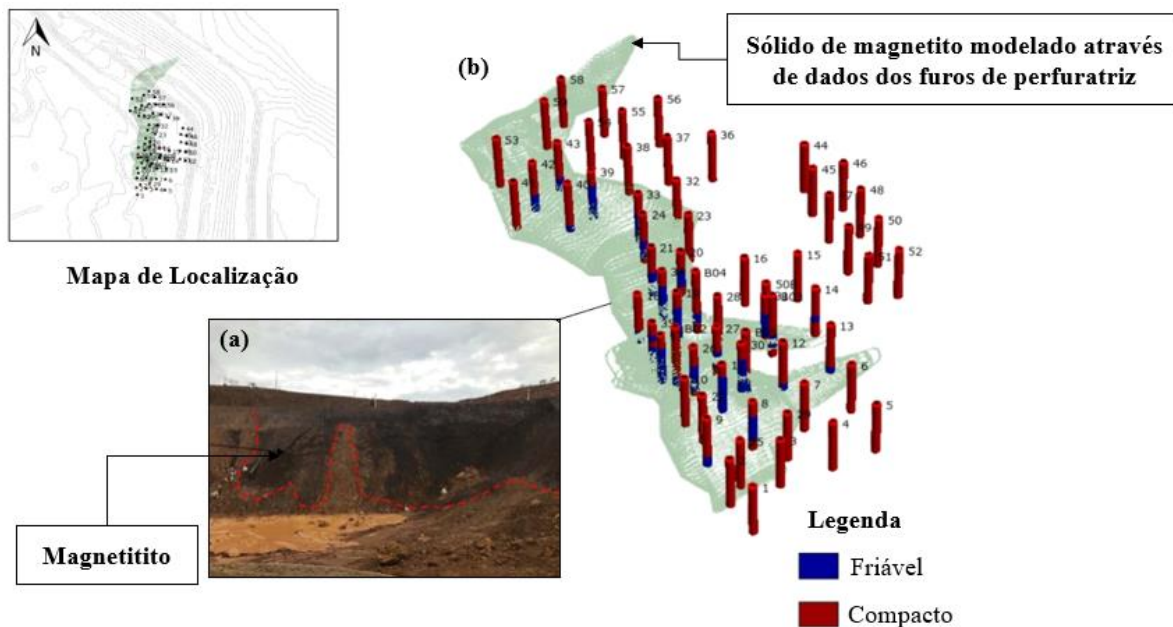


Figura 42 - Associação de regiões condutivas (valores entre 300 ohm.m e 550 ohm.m) nas seções geofísicas de CE. (a) Detalhe do contato do Magnetitito. (b) Modelo 3D do corpo friável de Magnetitito.

Fonte: Adaptado de Neogeo Geotecnologia LTDA, 2018.

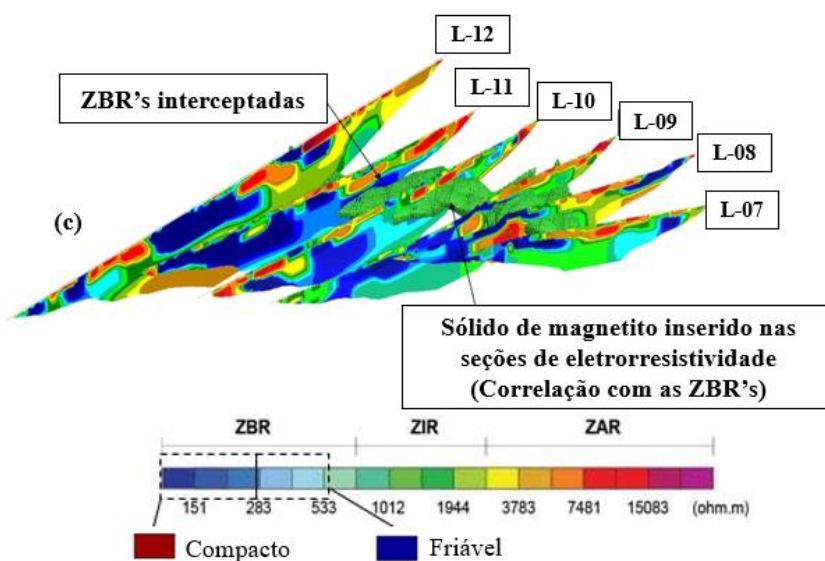


Figura 43 - Associação de regiões condutivas (valores entre 300 ohm.m e 550 ohm.m) nas seções geofísicas de CE. (c) Correlação do modelo 3D com as ZBR's.

Fonte: Adaptado de Neogeo Geotecnologia LTDA, 2018.

Segundo a empresa Neogeo (2018), as linhas geofísicas de eletrorresistividade L-01 a L-15 foram executadas na região das bancadas da Cava Leste com o objetivo de auxiliar as seções de Caminhamento Elétrico (CE) quanto ao entendimento de possíveis zonas saturadas, diferenciação de materiais e identificação de possíveis discontinuidades ao longo das bermas e/ou taludes (Figura 44). A disposição das linhas referentes ao método de GPR na região da

Cava Leste foram realizadas coincidentemente com as executadas por eletrorresistividade. Através destas linhas de GPR, foi possível observar Planos de descontinuidades, que apresentam-se como interrupções na horizontalidade dos refletores, que se destacam entre as reflexões. Tais descontinuidades são demarcadas nas linhas por meio de superfícies em cor magenta nas seções, como por exemplo na L-06 (Figura 45).

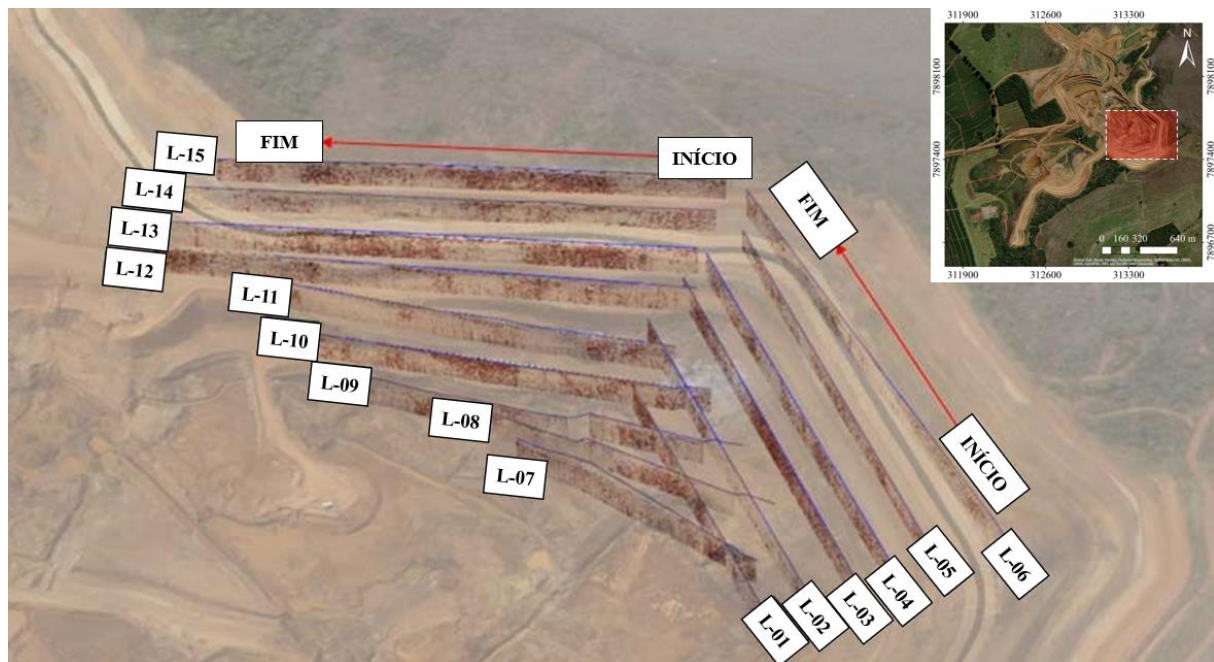


Figura 44 - Linhas de GPR localizadas nas bancadas, contexto da Cava Leste.
Fonte: Adaptado de Neogeo Geotecnologia LTDA, 2018.

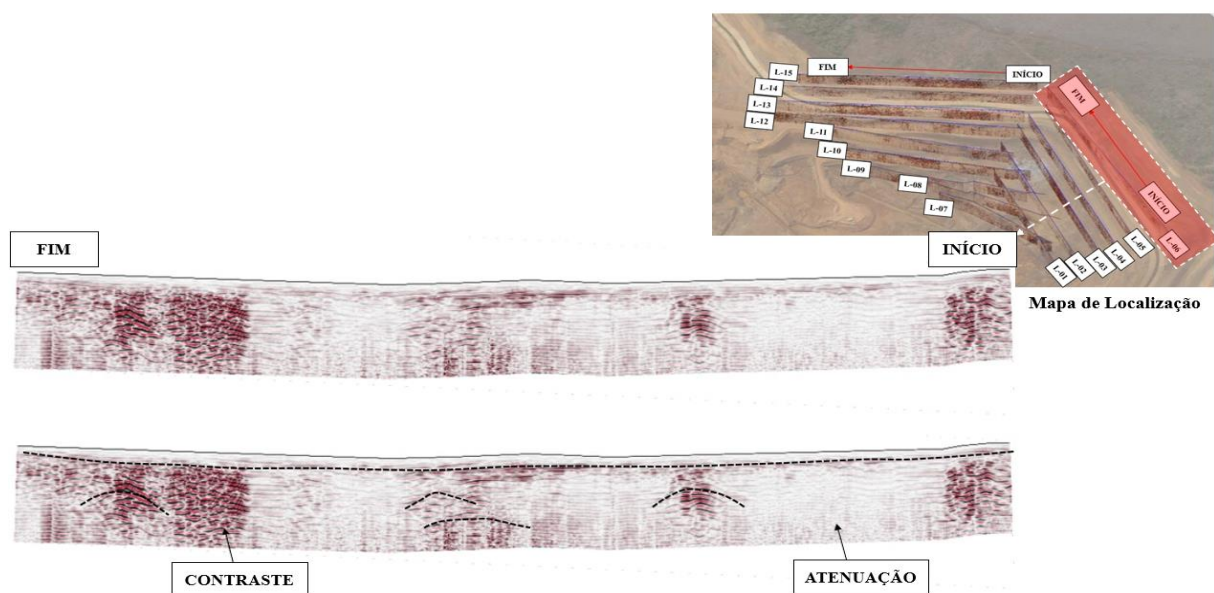


Figura 45 - Representação de padrão de refletores no contexto da Seção L-06. Seção de GPR localizada na bancada, contexto da Cava Leste (CMP). A linha preta tracejada representa as demarcações geofísicas inferidas (horizontes e hipérboles).
Fonte: Adaptado de Neogeo Geotecnologia LTDA, 2018.

A análise das seções de L-01 a L-06 de Eletorresistividade (CE) permitiram a verificação de zonas condutivas que persistem em diversas seções, tais regiões condutivas sugerem possíveis descontinuidades e/ou caminhos preferenciais de água que acabam por aumentar o processo de alteração das rochas e, conseqüentemente, a redução nos valores de resistividade aparente, essas descontinuidades foram demarcadas nas seções da Figura 46 por meio de um tracejado preto pontilhado (NEOGEO, 2018). O conjunto de lineamentos denominados *trend* de famílias, obtidos pelo estudo da Neogeo, coincidem com a direção das trincas observadas em campo (mapeamento geológico-geotécnico das cavas em julho de 2018 pela área de geotecnia da mineradora em estudo– detalhe descrito no presente documento) A presença de tais estruturas, associadas à ocorrência de água em material saprolítico, aumentam o risco geotécnico a depender da direção do avanço da lavra.

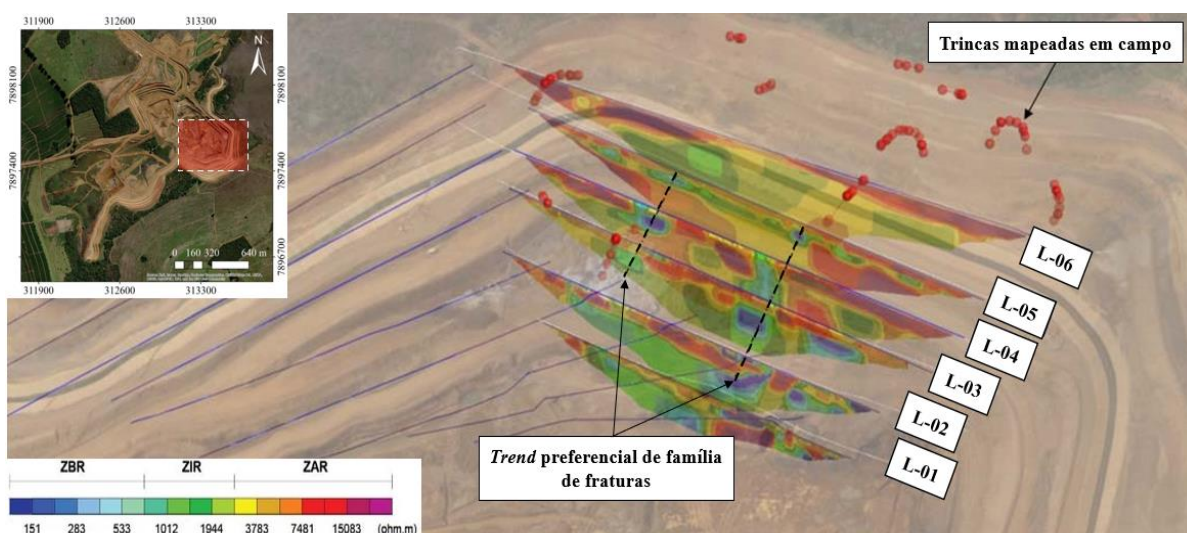


Figura 46 - Correlação entre assinaturas geofísicas condutivas de Eletorresistividade (CE) com trend preferencial de família de fraturas previamente mapeadas.

Fonte: Adaptado de Neogeo Geotecnologia LTDA, 2018.

3.2. Caracterização Geométrica de Fraturas na Mina

Em 2019 foi realizado um trabalho de levantamento estrutural no manto de intemperismo, em parceria com a Fundação CEFET Minas. De acordo com o relatório gerado, o padrão de fraturamento N-S, identificado na Cava Leste, havia sido observado por Hasui e, por se tratar de uma possível família de fraturas, com continuidade em profundidade pode ter forte influência na drenagem da água proveniente da área da turfa, à norte da Cava Leste. Essa área é uma paleolagoa, preenchida por sedimentos argilosos e turfa, tida como um aquífero de

grande importância local. O segundo padrão importante com direção NW-SE também foi observado por Hasui, e sua influência é sobre a drenagem da Cava Leste para a Cava Norte (Figura 49).

O relatório também aponta que, na região 6 há potencial para instabilidade dos taludes por rupturas planares, pois, a família de fraturas que predomina nesse local possui orientação similar à orientação média dos taludes. Nas demais áreas da Cava Sul as estruturas são perpendiculares à orientação dos taludes, aumentando a estabilidade.

Já na Região 8 há ocorrência de uma litologia denominada Flogopitito alterado (Figura 47), com localização pontual e sem continuidade lateral expressiva (CEFET, 2019). Em ensaios de fluorescência de raios-X neste material encontrou-se as seguintes fases minerais: Apatita, Filossilicatos (vermiculita, flogopita, antigorita, crisotila, montmorilonita, nontronita), minerais portadores de ferro (magnetita, ilmenita, goethita, agnesioferrita), anatásio, quartzo, carbonatos dentre outros em menores proporções. Essas acumulações de filossilicatos apresentam várias descontinuidades, não possibilitando visualizar a direção ou mergulho preferencial (CHABAN, 2011).

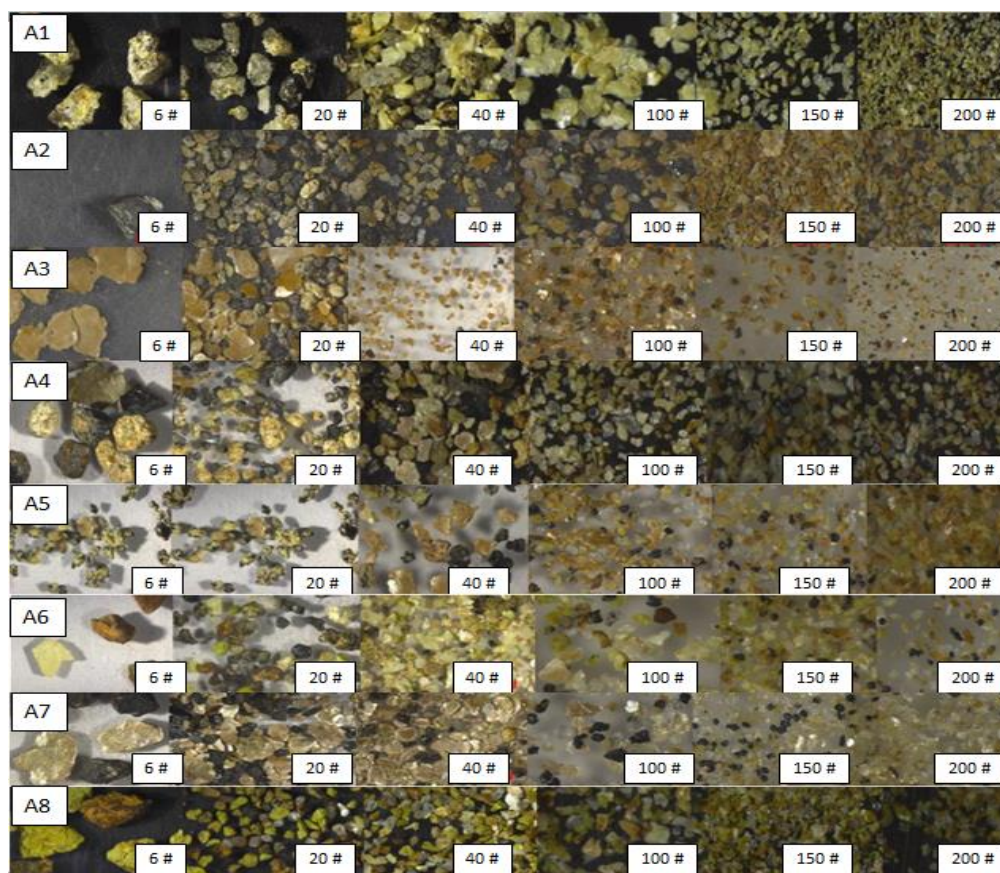


Figura 47 - Imagens de estereomicroscópio das amostras do Flogopitito Alterado
Fonte: Autor, 2024.

Os filossilicatos são os que mais influenciam de forma negativa na estabilidade dos solos, visto que entre sua mineralogia a esmectita apresenta caráter expansivo quando hidratada, baixa competência e possui uma clivagem preferencial, caracterizando risco de estabilidade ao talude (Figura 48).



Figura 48 - Detalhe do talude durante o rompimento, devida a presença de Flogopitito Alterado.

Fonte: Autor, 2024.

As regiões 6 e 8 da Cava Sul apresentam afloramento de Flogopitito, conforme a Figura 49. Os estereogramas de tais regiões indicam que os corpos de Flogopitito apresentam direção NW-SE e mergulho para NE, tal qual a orientação regional (no entorno da mina), mapeadas pelo trabalho de Borges (2018) e local pelo CEFET (2019).

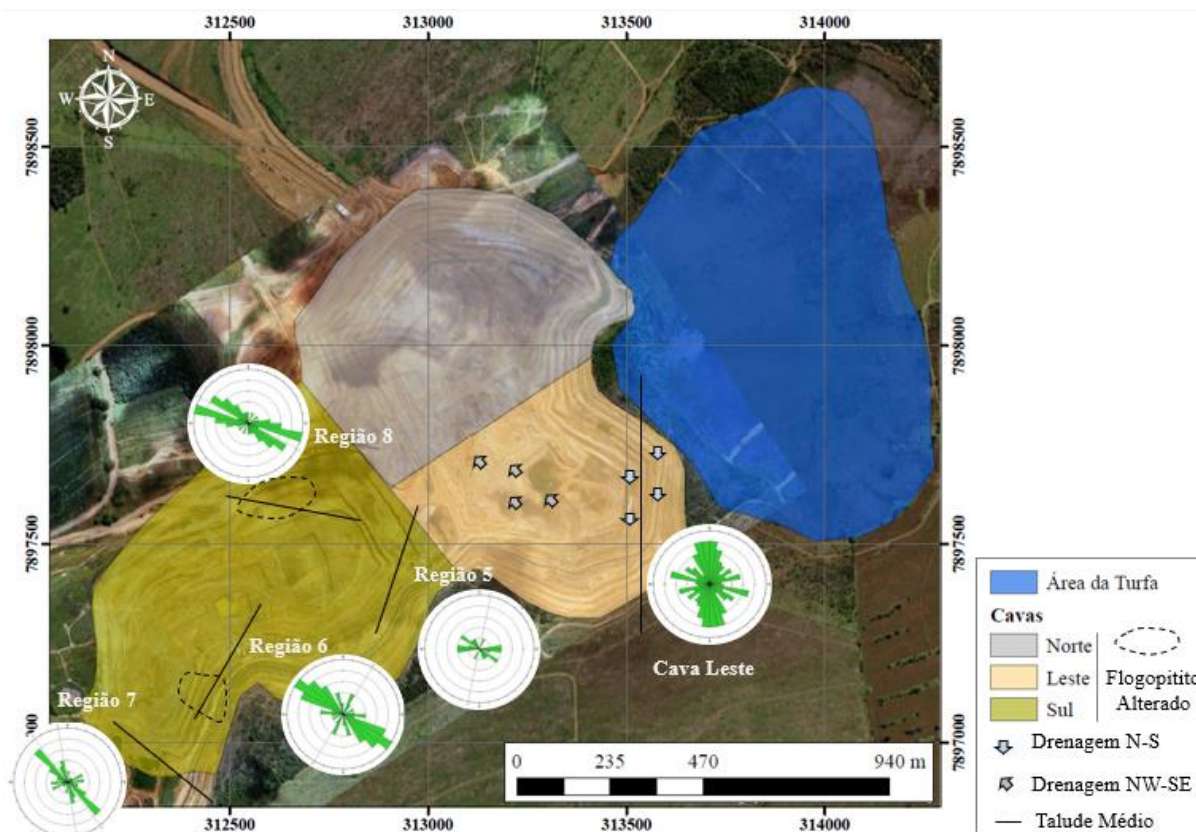


Figura 49 - Principais fraturas mapeadas em campo e influência sobre a drenagem na Cava Leste.

Fonte: Autor, 2024.

3.3. Dados de Testemunhos de Sondagens

Foi realizada uma avaliação do Grau de Fraturamento e Designação da Qualidade da Rocha (RQD) na descrição dos testemunhos de sondagens da empresa de mineração que atua na área de estudo. Foi utilizada a descrição de 689 furos que atingiram a Rocha Sã, sendo as litologias descritas: Bebedourito (BEB), Carbonatito (CBN), Flogopitito (FLO) e Magnetitito (MGN). Foi feito o agrupamento dos testemunhos em NOB (Não observado) onde o grau de fraturamento e RQD não foram descritos, mesmo tendo atingido a rocha sã.

Salitre I consiste em uma intrusão bebedourítica, com injeções de carbonatito, sendo assim há predominância da primeira litologia sobre a segunda. Essa característica também é observada no suporte amostral, uma vez que 56,7% dos furos que atingiram a rocha sã (RSA) são de bebedouritos (BEB), enquanto 42,1% são de carbonatitos (CBN).

Avaliando-se os gráficos (*Figura 50* e *Figura 51*) observa-se que, apesar da maior proporção de BEB em relação ao CBN, o comportamento das litologias é semelhante quanto ao grau de fraturamento e RQD.

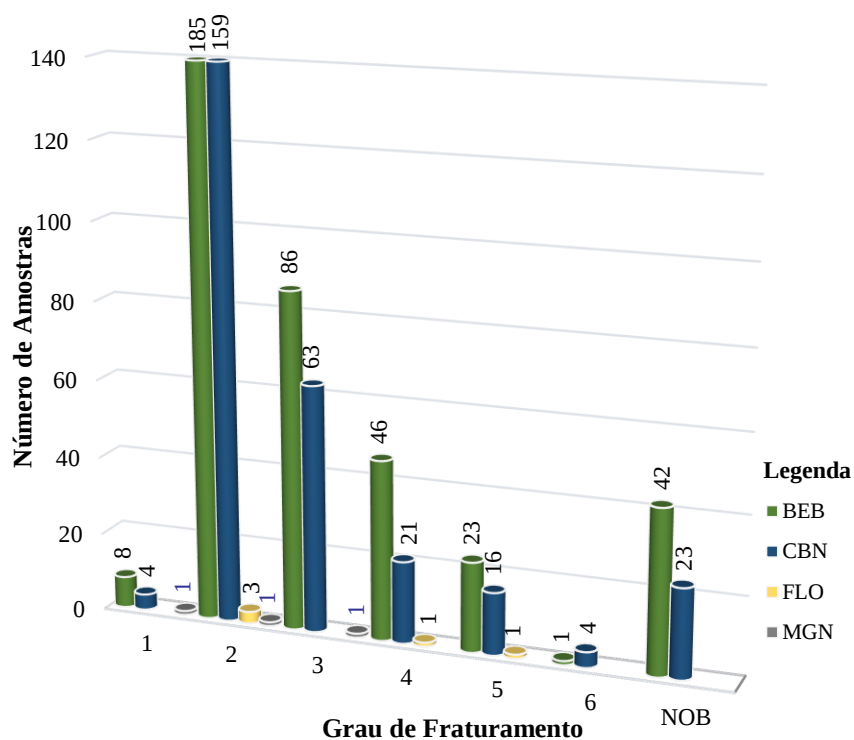


Figura 50 - Resultados do Grau de Fraturamento dos furos de sondagens da Rocha Sã.
Fonte: Autor, 2024.

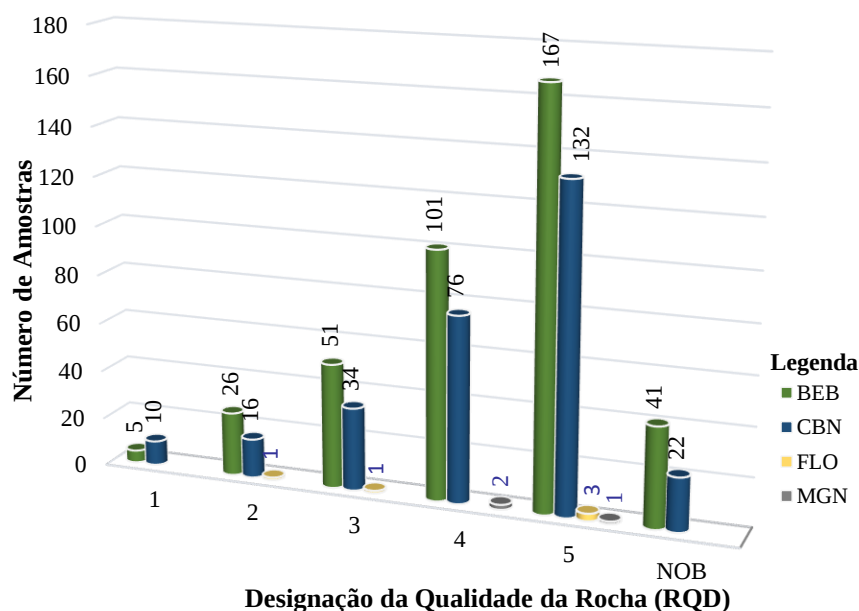


Figura 51 - Resultados do RQD dos furos de sondagens da Rocha Sã.
Fonte: Autor, 2024.

Para auxiliar na compreensão da relação entre litologia, grau de fraturamento e RQD, as rochas foram divididas em função da qualidade física:

- ✓ Bom: amostra maciça a moderadamente fraturada, com o RQD de regular a excelente;

- ✓ Ruim: amostra muito fraturada a fragmentada, com o RQD pobre a muito pobre.

Nos dois grupos individualizados houve diminuição do número de amostras (Figura 52), à medida que a qualidade da rocha diminui (Fraturamento 2 e 3; RQD 4 e 5).

Apesar da forte alteração intempérica no interior do domo, gerando horizontes com mais de 200 metros de material saprolítico, a maioria das rochas possui qualidade física boa, quando se avalia o RQD. A maior quantidade de rochas de qualidade boa, em relação às ruínas pode estar associada à estabilidade tectônica local, que acarreta o baixo fraturamento das rochas. Além disso, a atuação do intemperismo tende a atuar de forma homogênea no interior do anel quartzítico.

As litologias flogopitito (FLO) e magnetitito (MGN) não foram consideradas na avaliação, em função do baixo quantitativo de amostras no horizonte da rocha sã (RSA).

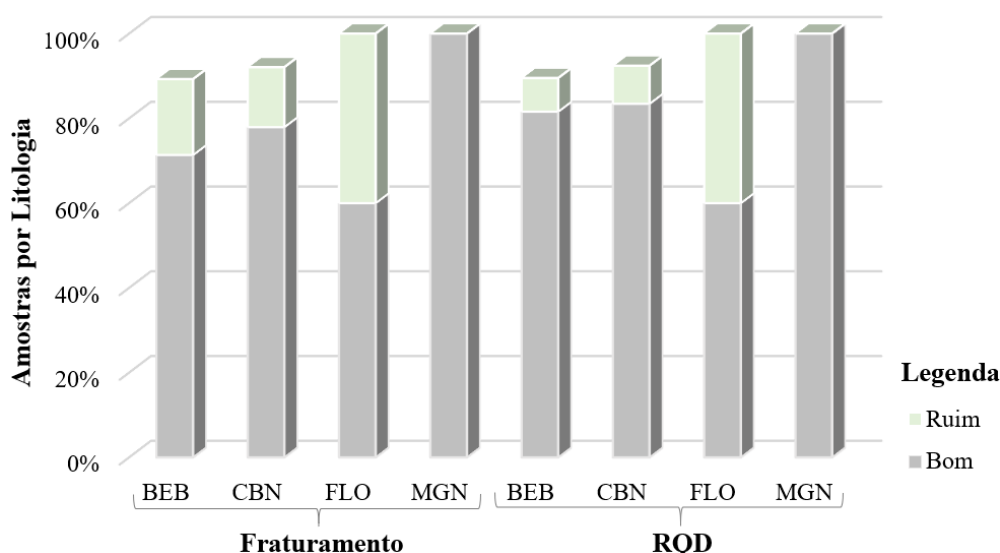


Figura 52 - Proporção de amostras em função da qualidade da rocha sã por litologia.
Fonte: Autor, 2024.

3.3. Dados Geofísicos de Eletorresistividade, Magnetismo e GPR

Conforme visto no item 3.2, de maneira geral o intemperismo atua de forma homogênea no domo do Salitre I. No entanto, em algumas regiões a tectônica local pode influenciar na alteração intempérica, e por conseguinte na disposição dos horizontes de intemperismo.

Hasui (2010), interpretou falhas, avaliando os resultados de eletorresistividade indicadas pelas linhas verdes e vermelhas na Figura 53. Ao avaliar-se o horizonte de intemperismo na seção A-A' nota-se que há uma mudança no perfil padrão do intemperismo

(Figura 54). O Furo CMP-SAL-DH-0231 mostra um intervalo de 110 metros de espessura de Horizonte Micáceo abaixo do RSI. Como se sabe, o Horizonte Micáceo possui grau de alteração maior que RSI, logo não é esperada a presença do Micáceo estratigraficamente abaixo do RSI.

Tal situação indica que as falhas interpretadas por Hasui podem condizer com condutos para percolação de água em profundidade, fazendo com que o intemperismo atue pontualmente com maior expressividade, como visto no furo supracitado.

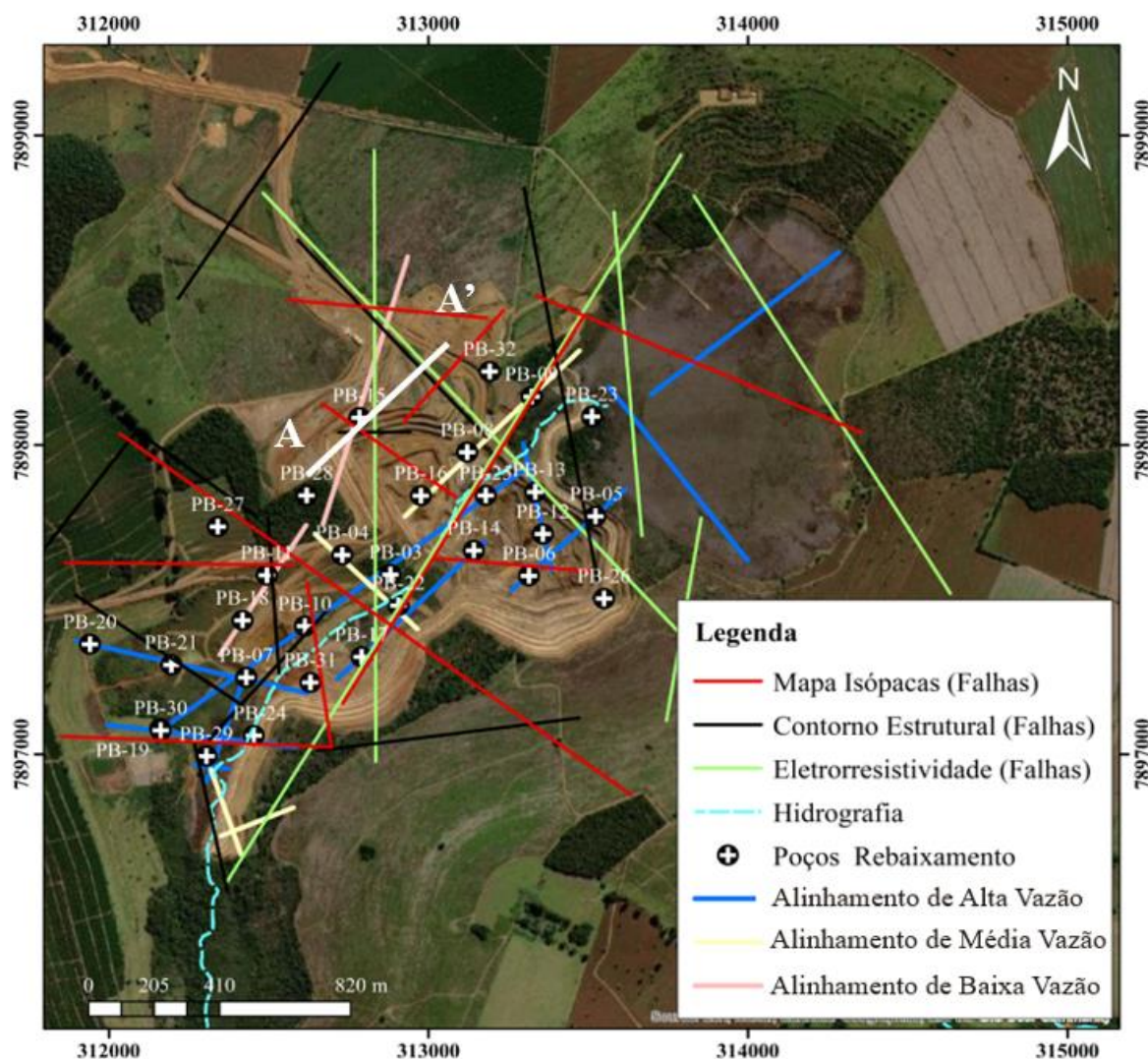


Figura 53 - Mapa de alinhamento das vazões dos poços associadas as falhas de Hasui (2010) e seção A-A'.

Fonte: Autor, 2024.

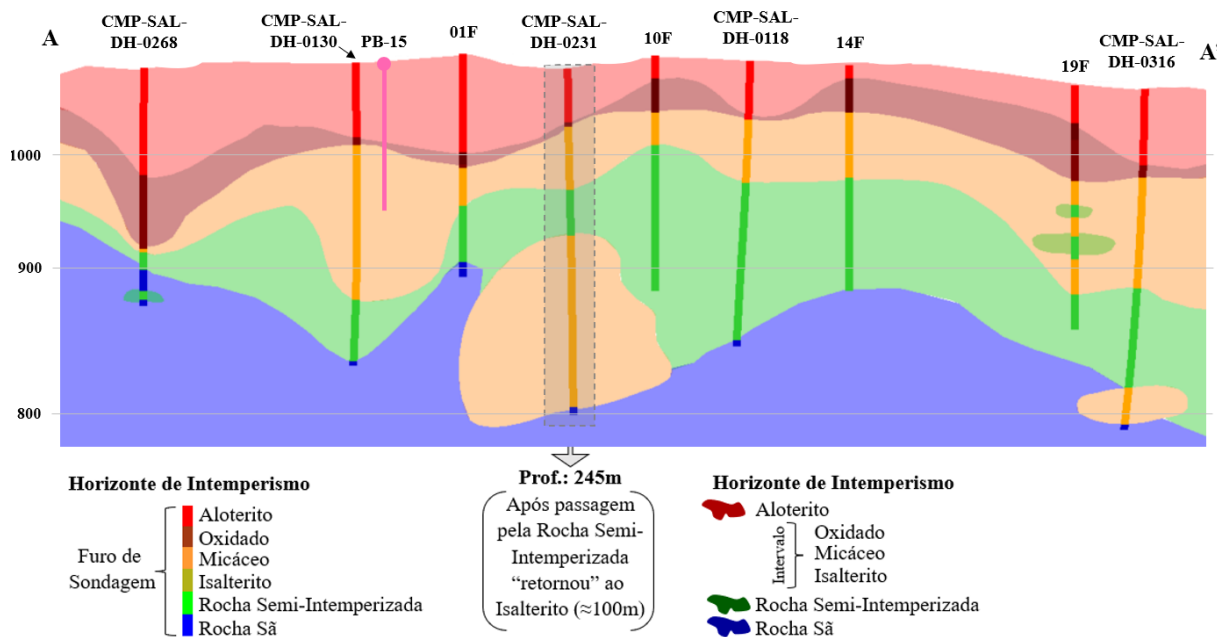


Figura 54 - Perfil gerado no alinhamento de baixa vazão do PB-15 (NE-SW), neste destaca-se o topo rochoso e furos de sondagem, indicando o aumento da espessura do manto de intemperismo especificamente no CMP-SAL-DH-0231.

Fonte: Autor, 2024.

Através das vazões dos poços de rebaixamento, avaliação preliminar das estruturas interpretadas por Hasui, e o conhecimento da geologia local da mina da área de estudo, observou-se que os lineamentos de alta vazão estão associados a direção do córrego do Bebedouro, com orientação NE-SW.

Conforme observado no perfil da Figura 54, no furo de sondagem CMP-SAL-DH-0231, notou-se que na região onde há aumento da espessura do manto de intemperismo (aproximadamente 245 m), Hasui havia interpretado uma falha, e os poços de rebaixamento possuem baixa vazão. A presença de um conduto preferencial para percolação da água, como uma falha, abaixo da bomba de captação desses poços, pode ser o fator que acarreta no baixo volume de água bombeada pelos mesmos.

O perfil gerado na região no eixo da Linha 5 de eletrorresistividade, também permite interpretar que há atuação de estruturas rúpteis na região (Figura 55). Como nota-se através do aumento da espessura do aloterito de forma brusca para leste, corroborando com a assinatura dos horizontes intempéricos de resposta da geofísica. Além do exposto, é informado no relatório de implementação do Poço de Bombeamento 09 (PB-09) que após uma profundidade de 47 metros houve perda total de fluido utilizado no avanço da perfuração pela sonda, ou seja, sem circulação deste produto. Importante ressaltar que o material descrito pouco antes de alcançar a profundidade mencionada foi um Isalterito, castanho amarelado e friável (com traços de

magnetititos). Demonstrando assim, uma boa correlação entre os perfis/modelo geológico-geotécnico, dados de eletrorresistividade e dos poços de bombeamento.

A leste desse perfil há uma paleolagoa, cujo manto de intemperismo ultrapassa 300m de profundidade. Em 2021 foram realizadas novas campanhas de sondagem no local, que permitiram ampliar o perfil longitudinalmente, visando complementar as informações referentes à presença de falhas nessa região.

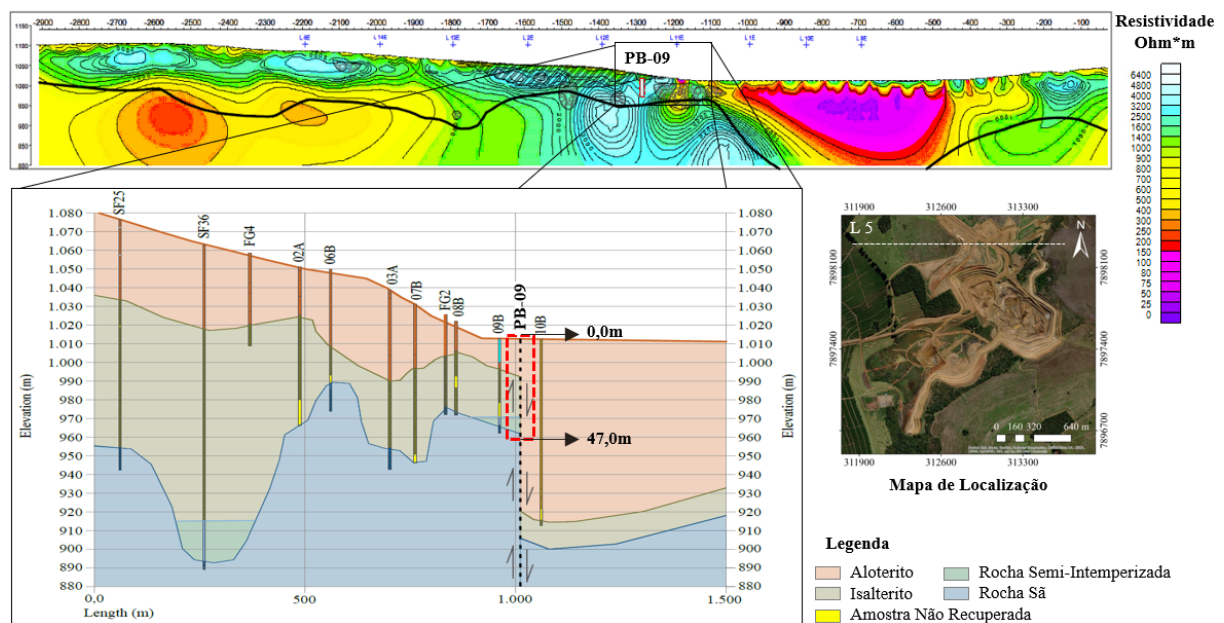


Figura 55 - Perfil com falha interpretada, através da espessura dos horizontes de intemperismo (campanha histórica de sondagem diamantada) e Linha 5 da campanha de eletrorresistividade.

Fonte: Adaptado de E-Geo, 2009.

Anteriormente ao levantamento de eletrorresistividade realizado em 2018 (Figura 56), entre os anos de 2006 e 2007, foram realizados levantamentos de eletrorresistividade do local de estudo, em 9 linhas N-S, 9 linhas E-W, 2 linhas NE-SW e 2 linhas SW-NE (). Ao contrário do trabalho de 2018 que teve como foco a região da Cava Leste, os levantamentos de 2006 e 2007 abrangeram toda a área da mina (PRODUTO 17, 2009), permitindo interpretações correlacionando eletroresistividade e modelagem geológica realizada pela interpretação dos testemunhos de sondagem.

O resultados das seções de eletrorresistividade (Figura 58) foram aplicados para interpretação do perfis geológicos em subsuperfície. Utilizando-se da correlação entre os dados do modelo geológico, poços de rebaixamento e contrastes nas respostas dos dados geofísicos, foi possível identificar os diferentes materiais e possíveis falhas.

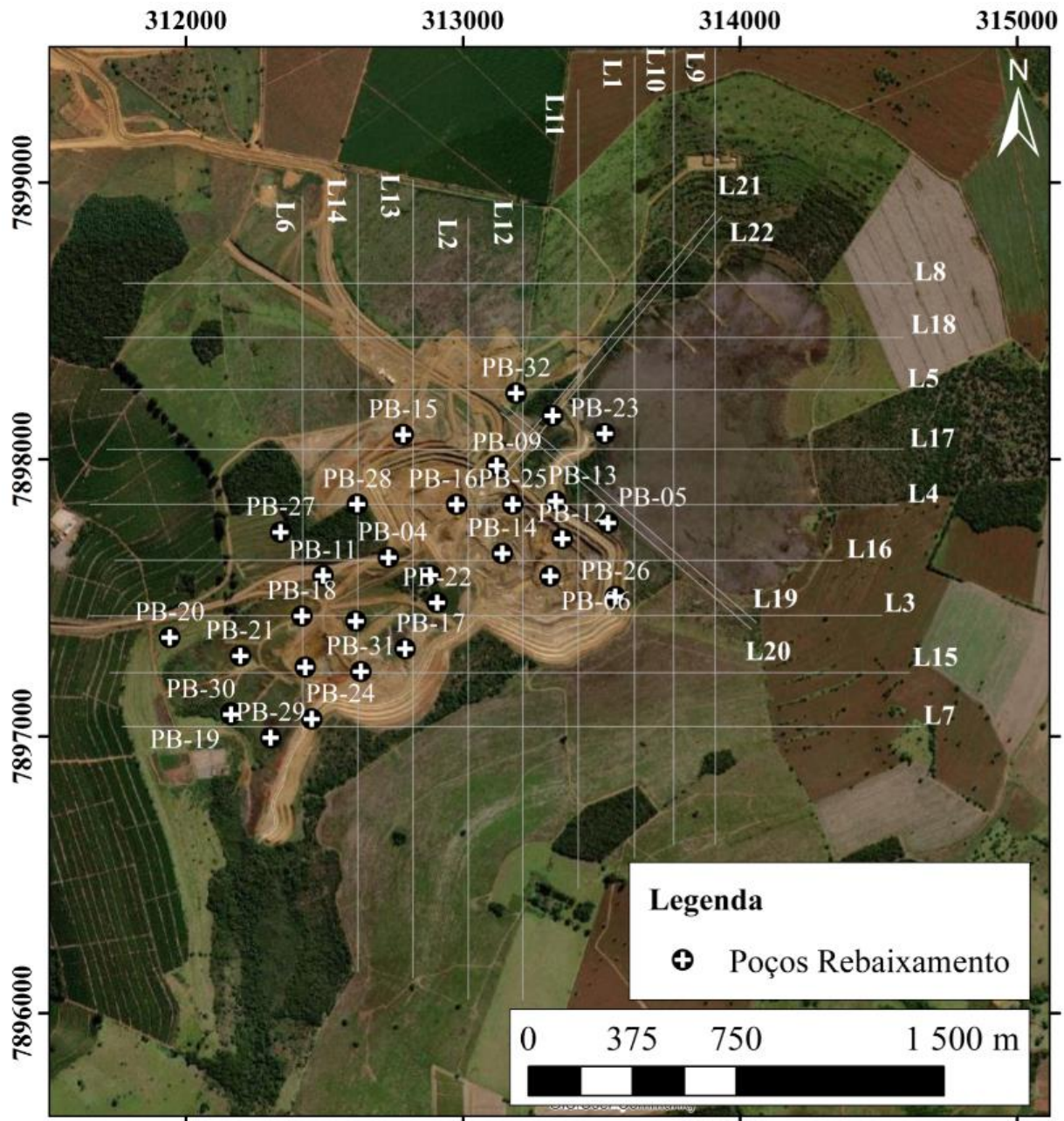


Figura 56 - Mapa de localização das seções de eletrorresistividade.

Fonte: Adaptado de Produto 17, 2009.

Para obter maior robustez na interpretação, foram associadas informações da geologia local, extraídas da descrição geológica dos testemunhos de sondagem.

Foram inseridas as informações de quatro principais materiais:

- Sedimento: proveniente do preenchimento da paleolagoa, com alta condutividade por se tratar de uma fonte de água local;
- Foscrete: material compacto com diversas cavidades, que conferem à esse

material alta condutividade;

- Manto de intemperismo: combinação do aloterito, isalterito e rocha semi-intemperizada;
- Rocha sã: rocha fresca, definição do topo rochoso.

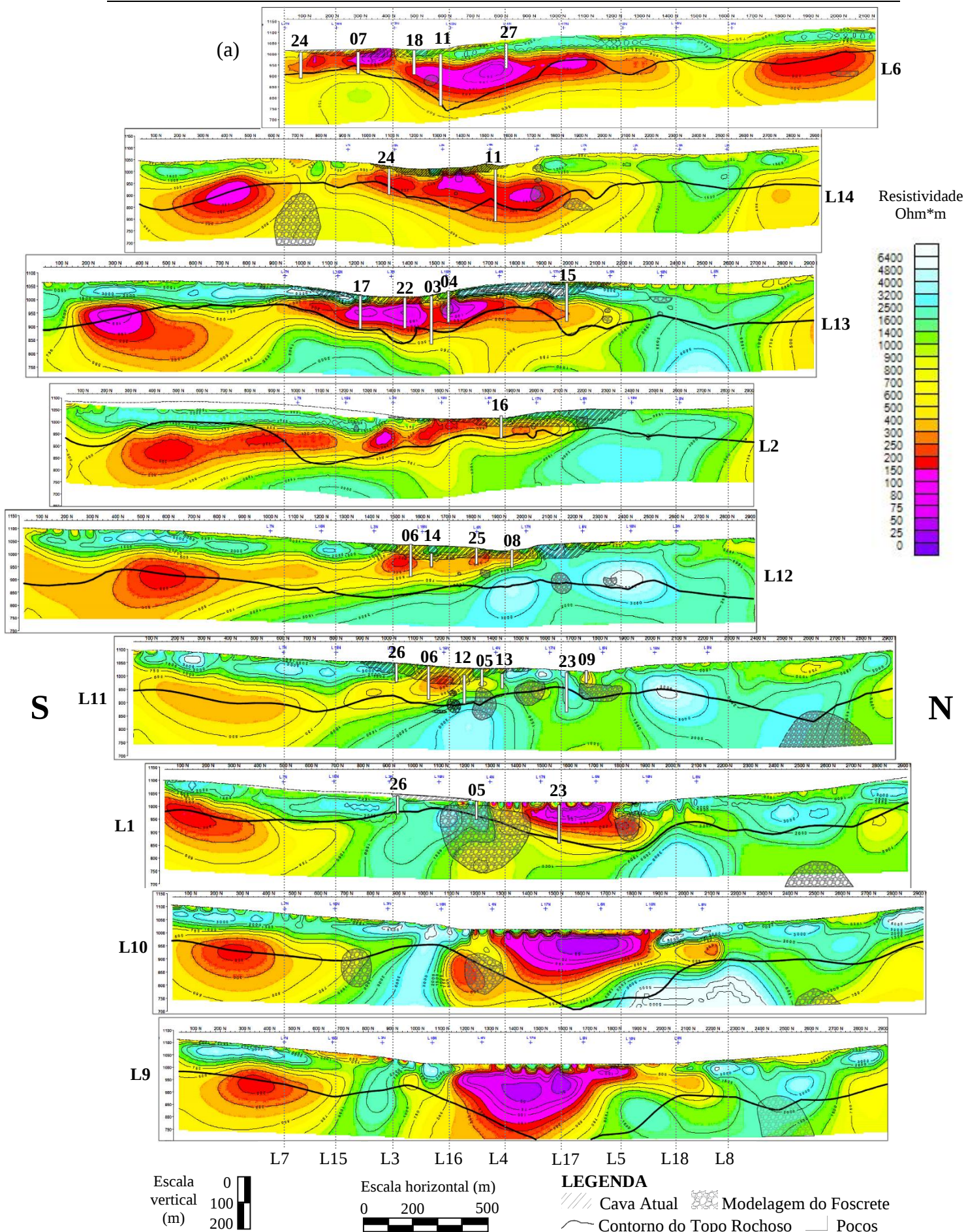
Os corpos de foscrete e o topo rochoso foram extraídos do modelo geológico de Patrocínio (TECHNICAL REPORT ON THE MINERAL RESOURCES ESTIMATES FOR THE PATROCÍNIO, 2020).

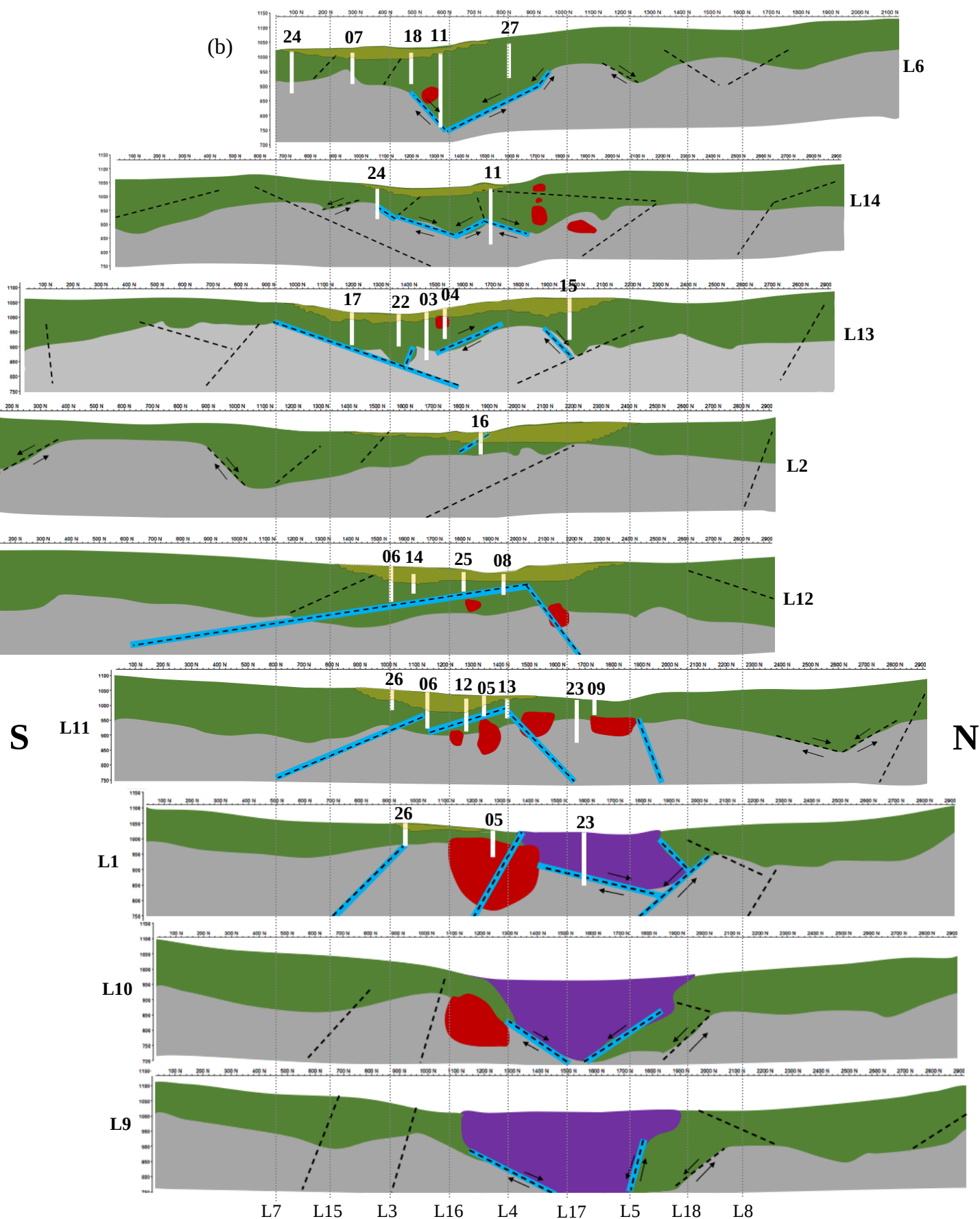
A argila e o foscrete são materiais cuja baixa resistividade / alta condutividade já são esperadas (cores quentes nas Figuras 57 (a) e (c)). Já o manto de intemperismo e a rocha sã não possuem uma resposta padrão, sendo assim, nesses locais foi avaliado principalmente o contraste entre a resposta de resistividade.

A interpretação apresentada na Linha 5 (Figura 56) permite definir uma falha, em função da mudança abrupta na profundidade do topo rochoso. Tal premissa também foi utilizada para interpretar as falhas nas seções geológicas e interpretadas por eletrorresistividade (Figura 57 (b) e (d)), com indicação da presença das mesmas em locais com diferença acentuada na profundidade do topo rochoso.

As informações de poços de bombeamento também foram associadas aos conceitos supracitados. Uma vez que sabemos a localização dos poços, e que os mesmos possuem vazão, podemos interpretar os locais com possível percolação de água, tais como falhas e fraturas.

Todos esses dados permitiram a interpretação geológica dos perfis N-S (Figura 57 (b)), E-W (Figura 57 (d)), NW-SE (Figura 57 (e)) e NE-SW (Figura 57 (f)), contemplando os diferentes tipos de materiais, as falhas interpretadas e os locais com potencial para presença de água.





Escala vertical (m)

0 100 200

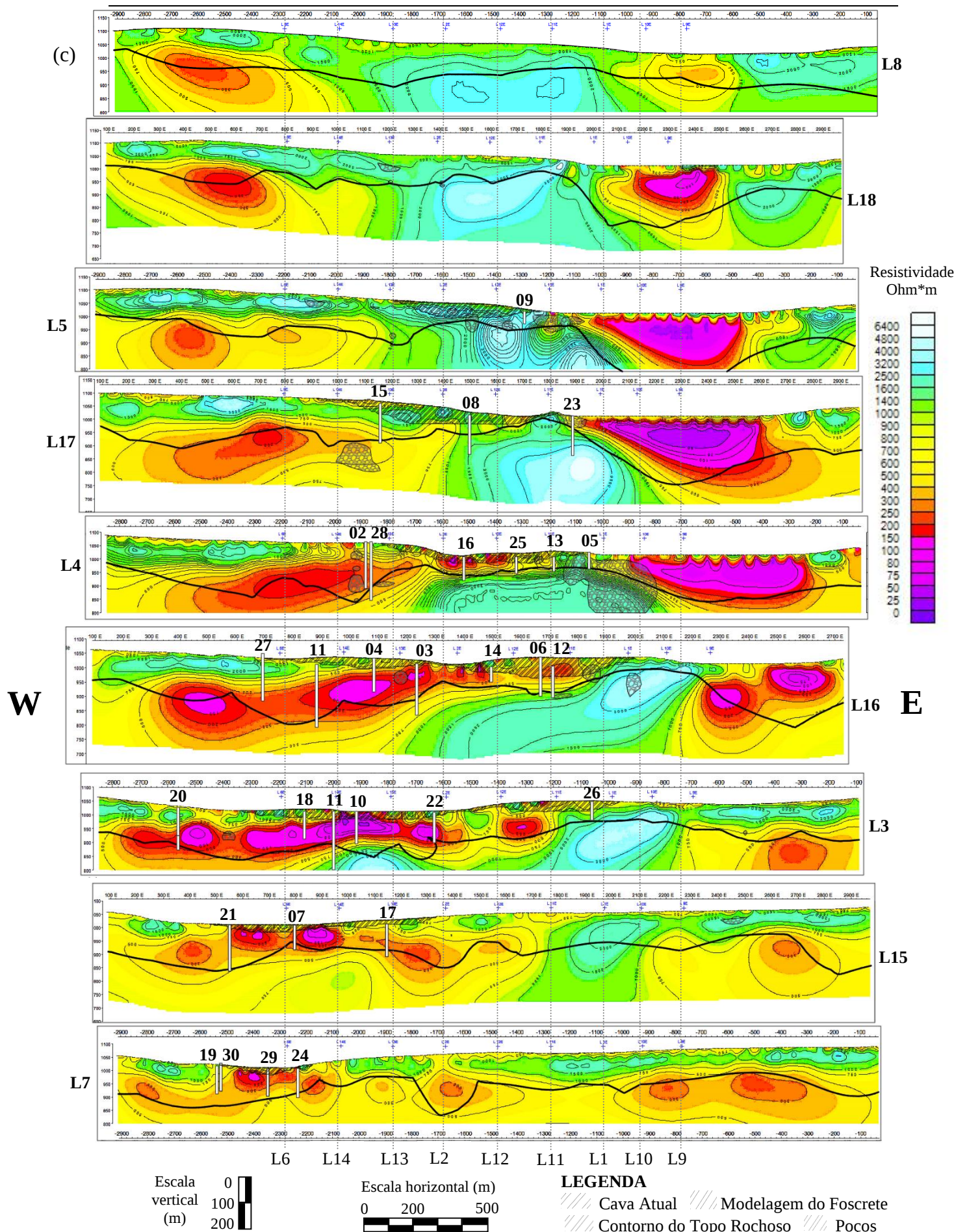
Escala horizontal (m)

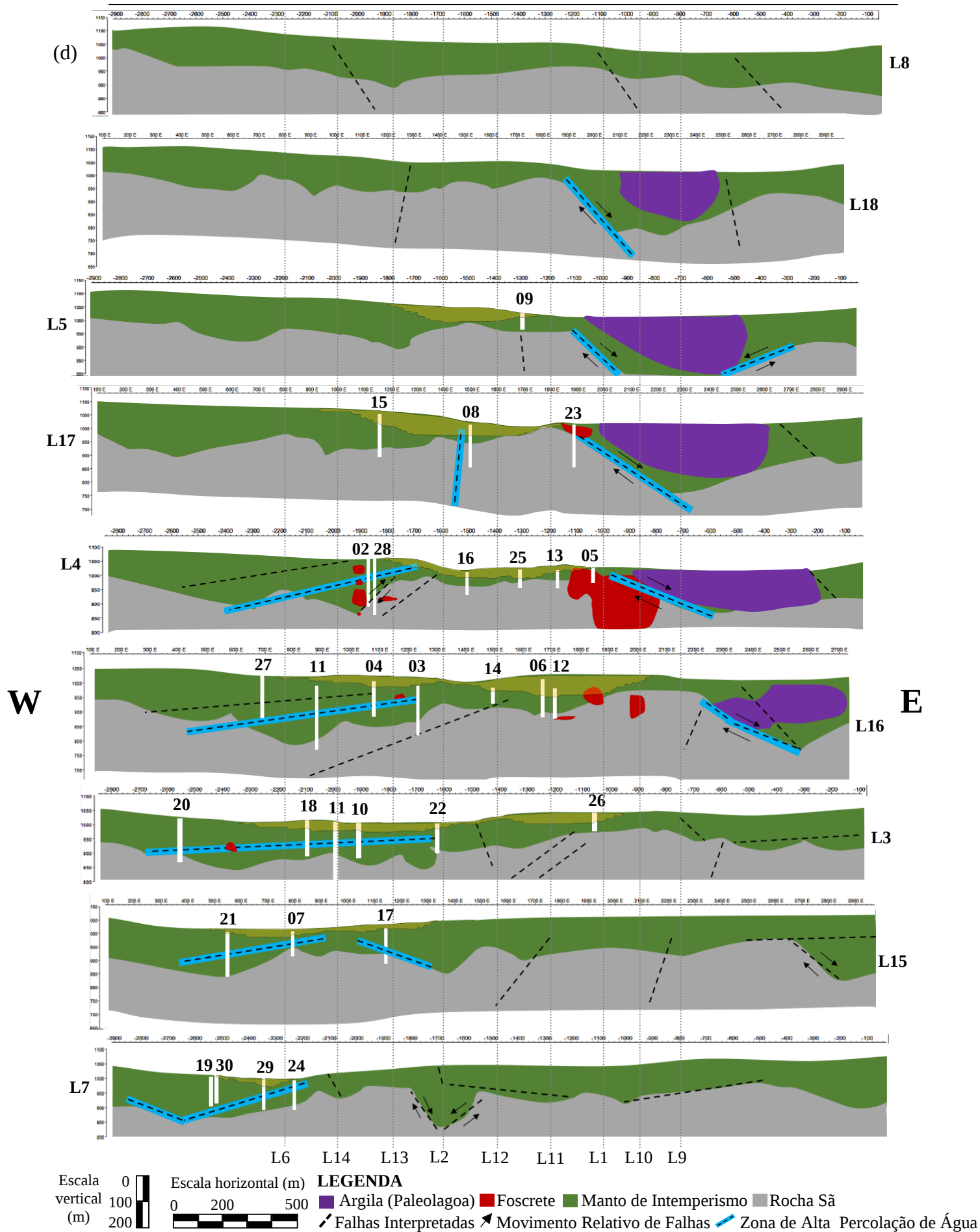
0 200 500

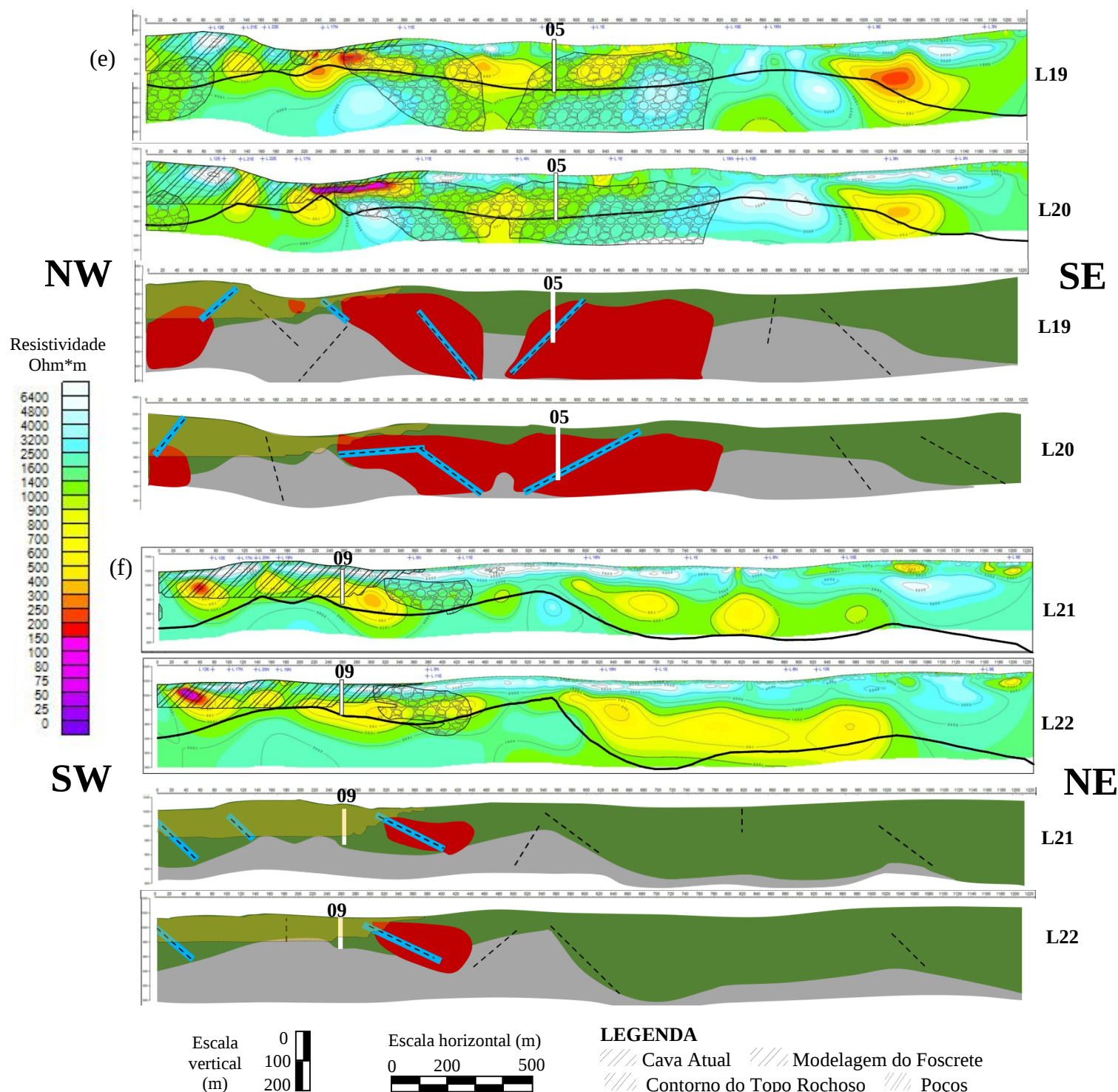
LEGENDA

Argila (Paleolagoa) Foscrete Manto de Intemperismo Rocha Sã

Falhas Interpretadas Movimento Relativo de Falhas Possível Percolação de Água







LEGENDA

Argila (Paleolagoa) Foscrete Manto de Intemperismo Rocha Sã
Falhas Interpretadas Movimento Relativo de Falhas Zona de Alta Percolação de Água

Figura 57 - a) Modelo de eletrorresistividade real das seções N-S. (b) Perfis geológicos interpretados a partir das seções N-S. (c) Modelo de eletrorresistividade real das seções E-W. (d) Perfis geológicos interpretados a partir das seções E-W. (e) Modelo de eletrorresistividade real das seções transversais e perfis geológicos interpretados NW-SE. (f) Modelo de eletrorresistividade real das seções transversais e perfis geológicos interpretados a partir das seções transversais NE-SW.

Fonte: Autor, 2024.

3.4 Dados Hidrogeotécnicos

A direção NE-SW representa as principais estruturas rúpteis mapeadas em campo. Esses lineamentos podem ocasionar instabilidade geotécnica durante os avanços da lavra, pois além das descontinuidades, essas também são marcadas pela percolação de água subterrânea (Figura 58).



Figura 58 - Percolação de água em superfície.

Fonte: Autor, 2024.

Da mesma forma, essa direção está relacionada ao controle estrutural do leito do Córrego do Bebedouro que pode ser observado pelo alinhamento dos poços de alta vazão (Figura 59). As descontinuidades associadas ao alto fluxo hídrico subterrâneo trás um grande desafio em questões operacionais de drenagem do fundo de cava e na direção do avanço assertivo dos taludes superiores. Essas condições podem afetar a estabilidade de toda a mina e o aproveitamento econômico do minério em questão.

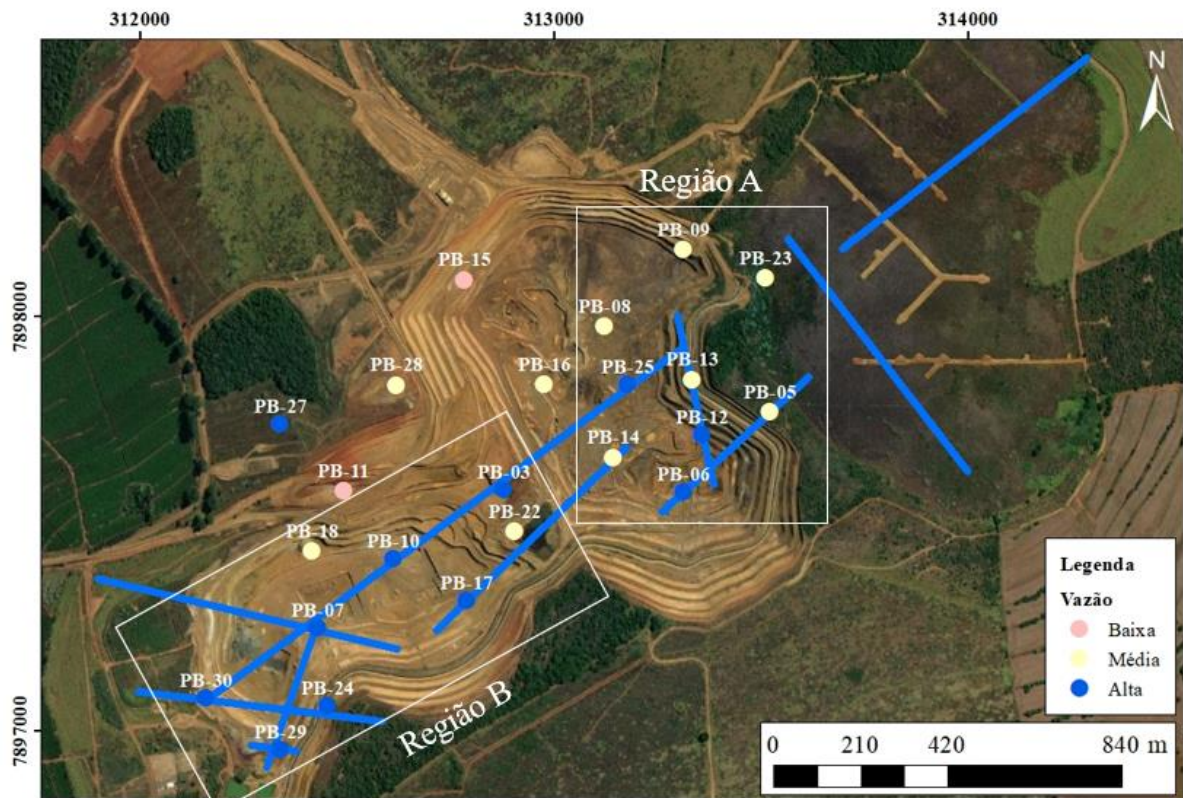


Figura 59 - Poços de rebaixamento de água (PB's) e a direção de alta vazão majoritariamente em NE-SW.
Fonte: Autor, 2024.

A presença de água em subsuperfície, confirmada pela vazão dos poços, também foi interpretada por meio das seções de geofísica e dados de modelagem geológica.

A região de alta vazão foi dividida em duas regiões (Figura 59). Na Região A tem-se os poços das seções L12 e L11 e na Região B os poços das seções L16, L3, L15 e L7 (Figura 60), corroborando com a interpretação realizada.

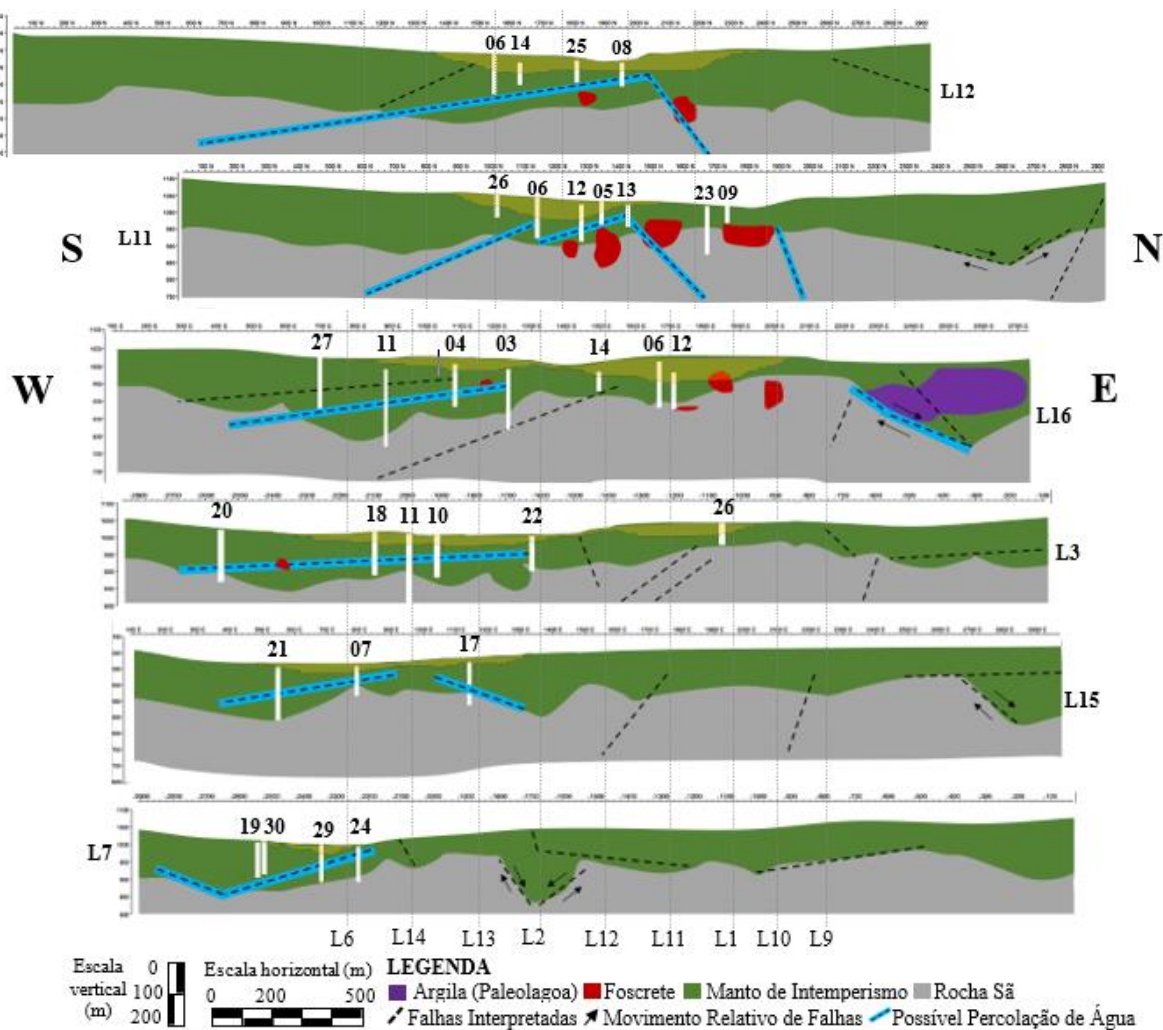


Figura 60 - Seções interpretadas nas regiões de alta vazão.

Fonte: Autor, 2024.

O estudo hidrogeológico foi feito em horizonte saprolítico proveniente do intemperismo de Bebedouritos e Carbonatitos, sendo um bom aquífero, com destaque para os níveis de magnetitito. Além disso, essa zona de isalteritos sofreu lixiviação e enriquecimento supergênico local. No domínio de carbonatitos a lixiviação foi mais intensa, gerando por vezes feições cársticas que são muito importantes no processo de percolação e fluxo da água subterrânea (Figura 61). Já o aquífero fissural é composto por zonas de discontinuidades verticais a subverticais, abertas e associadas a reativações de fraturas na área da jazida. Constituem zonas preferenciais para o direcionamento do fluxo subterrâneo (MDGEO, 2023).

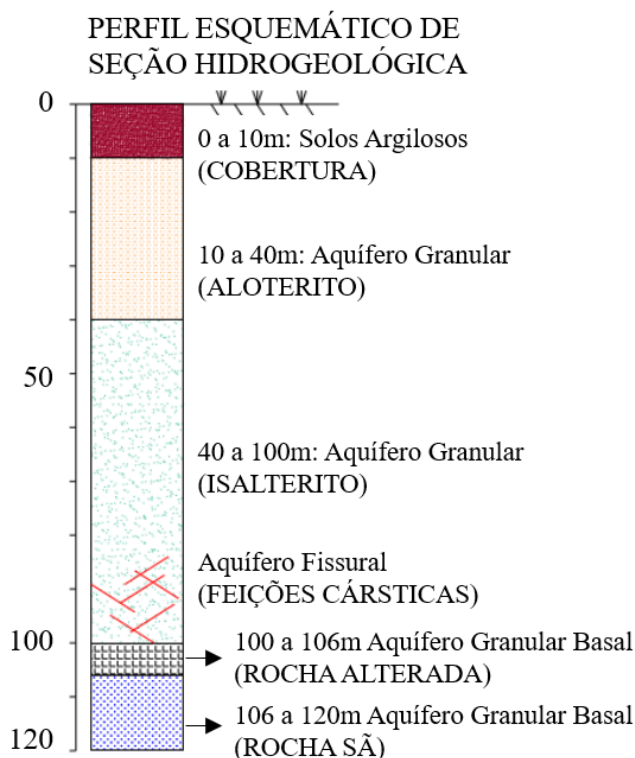


Figura 61 - Perfil esquemática com as unidades hidrogeológicas definidas na região da cava.
Fonte: MDGEO, 2023.

Segundo o trabalho da MDGEO (2023), a descrição das unidades hidrogeológicas no modelo baseou-se essencialmente nas características lito-estruturais (físicas) de cada unidade mapeada e ensaios em campo. Os parâmetros hidrodinâmicos são os principais controladores da dinâmica de fluxo das rochas subterrâneas. Para simular os aquíferos presentes na área de estudo, as unidades foram divididas de acordo com o atual modelo tipológico (ou de intemperismo) da mina, e não o modelo geológico (petrológico) das rochas do complexo devido ao seu contraste de condutividades. Em relação as discontinuidades, foi considerado o Córrego Bebedouro e as “falhas” mapeadas por Hasui (2010), sendo essas últimas correlacionadas com as variações pelas profundidades do topo rochoso.

A condutividade hidráulica é representada pela letra “K”, definida em m/dia para cada direção (K_x , K_y , K_z), conforme apresentado na Tabela 3. O armazenamento é aplicado de forma distinta para condições de aquífero confinado e livre conforme a litologia, com maior valor para as litologias mais permeáveis. A Figura 62, representa a vista tridimensional da distribuição das propriedades no modelo numérico (MDGEO, 2023).

Tabela 3 - Propriedades hidráulicas discretizadas no modelo numérico.

Propriedade	Litologia (Unidades hidrogeológicas discretizadas)	K (m/dia)
1	Rocha Fresca	0,0002
2	Aloterito / Argila	0,005
3	Aloterito / Canga	0,005
4	Aloterito / Turfa	0,00025
5	Isalterito / Bebedourito	0,1
6	Isalterito / Carbonatito	0,8
7	Descontinuidade no córrego bebedouro	10
8	Rocha alterada	2
9	Descontinuidades na área alagável e margem esquerda do córrego bebedouro	2
10	Descontinuidades na margem direita do córrego bebedouro	2
11	Sem recuperação / “Zonas Cársticas”	1

Fonte: MDGEO, 2023.

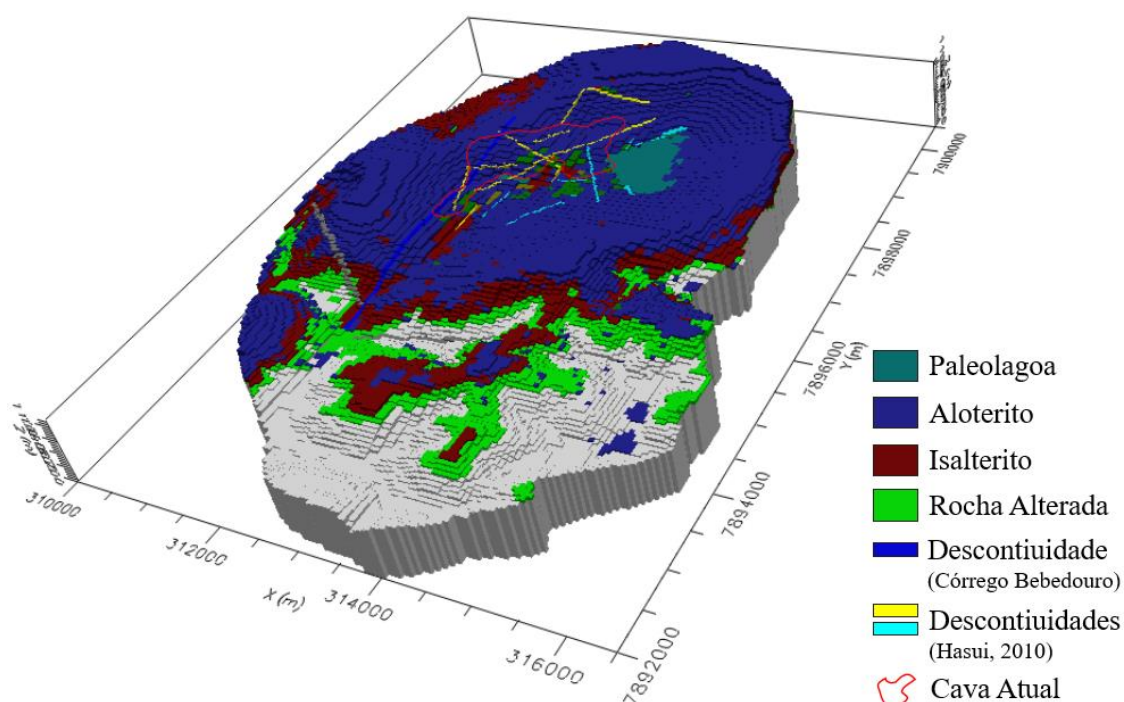


Figura 62 - Distribuição das propriedades hidrodinâmicas – vista tridimensional.

Fonte: MDGEO, 2023.

A dissertação de Santos (2023), trouxe resultados interessantes sobre a sensibilidade dos resultados entre os fatores de segurança dos taludes da mina considerando análises de estabilidade por modelo bidimensional e tridimensional. Neste estudo, os taludes da cava final apresentaram uma baixa qualidade geomecânica por serem compostos essencialmente por solos

e saprólitos (Figura 63 e Figura 64). No entanto, é importante ressaltar que não houve simulações de rupturas em cunha e/ou planar, pois trabalhos anteriores não possuem indicações de estruturas inferidas em saprólitos tais como falhas e contatos geológicos, nem informações sobre suas localizações exatas, tão pouco suas características geotécnicas modeladas. Além do exposto, também não se considerou a possibilidade de estabilizações devido a zonas/setorizações de condutos de água nas faces dos bancos por efeito dos lineamentos de altas vazões históricas apresentadas pelos poços de bombeamento, devido à ausência deste mapeamento hidrogeotécnico.

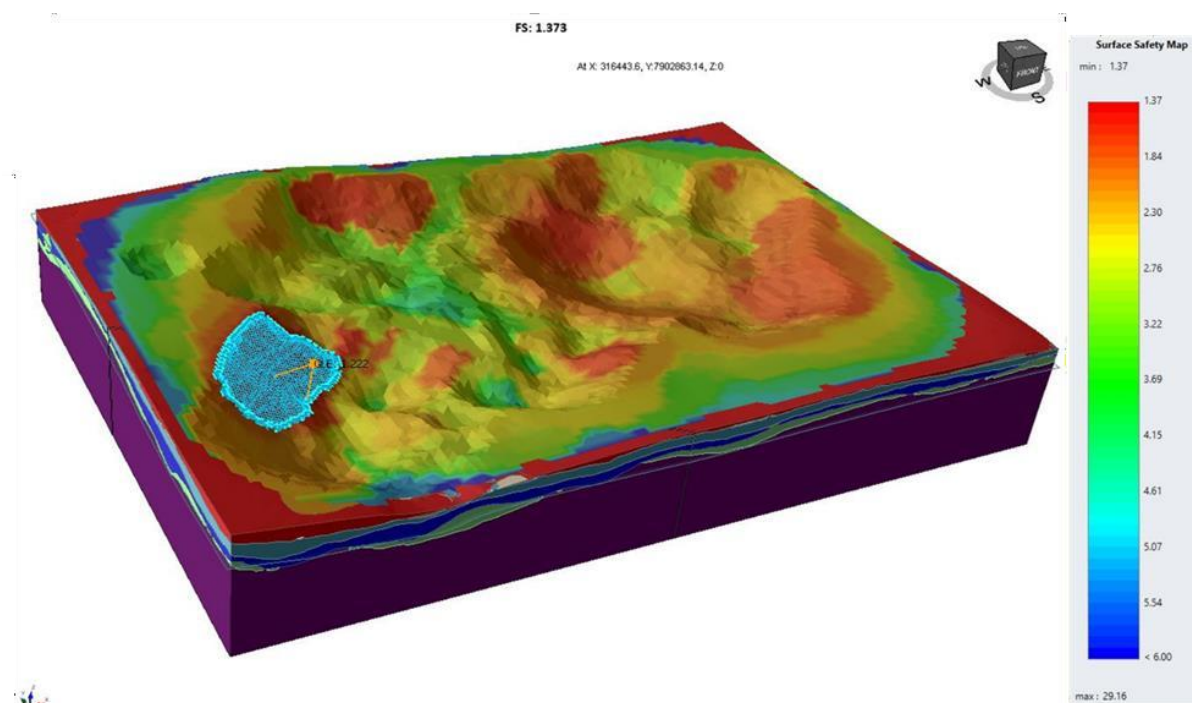


Figura 63 - Modelo tridimensional de análise de estabilidade de taludes e dados de contorno no mínimo global da ruptura circular da Cava Final.

Fonte: Santos, 2023.

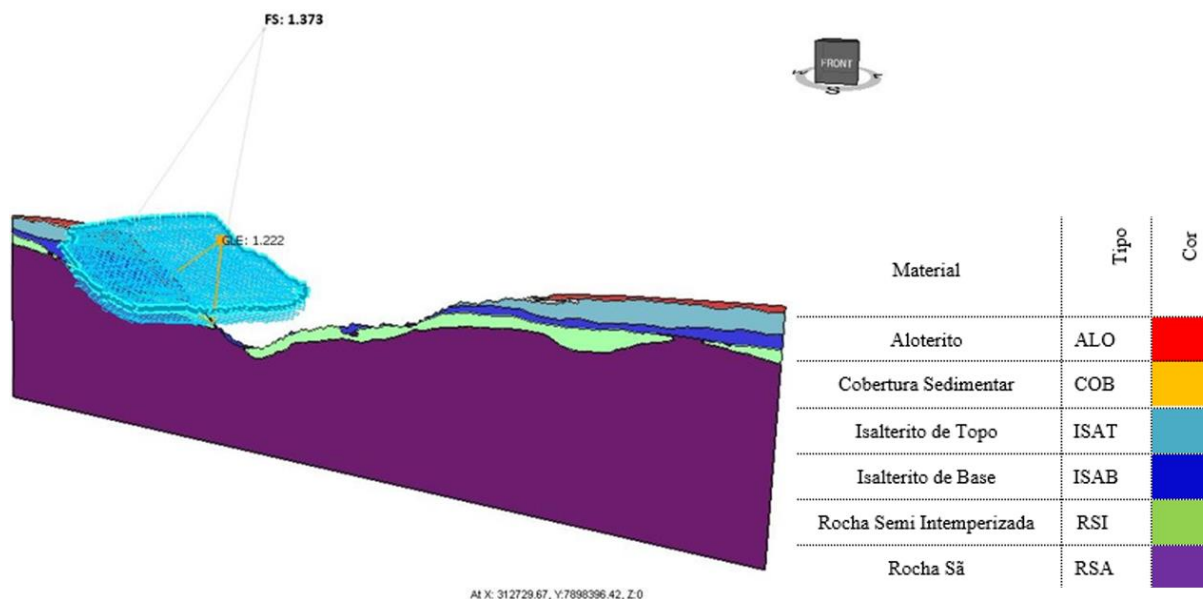


Figura 64 - Superfícies de ruptura tridimensional da Cava Final, representada em seção bidimensional.

Fonte: Santos, 2023.

Diante do exposto, foram avaliadas de forma detalhada as descrições de todos os relatórios de implantações dos poços de bombeamentos na cava da mineradora em estudo. O resumo foi compilado e é apresentado na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4 – Descrição geológica-geotécnica e pontos de atenção durante a instalação dos poços de bombeamento de água.

Poço (ID)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Descrição dos Pontos de Atenção dos Relatórios de Implantação dos Poços de Bombeamento de Água	Descrição Geológico-Geotécnicas das Amostras
PB-03	47	54	-	Dique flogopitito verde altamente alterado.
	54	57	-	Carbonatito verde magnetitito.
	81	90	-	Carbonatito amarelo, rico em apatita, muito fraturado aos 86 metros.
PB-04	50	118	Poço desmoronou diversas vezes, vindo a entulhar todo o intervalo perfurado de 50,00 aos 118,00 metros.	Carbonatito , castanho esverdeado, alterado, com pequenas passagens de foscrito duro.
	107	118	Houve perda total de fluido a 107,00 metros, sendo perfurado até 118,00 metros sem circulação.	* Sem retorno de amostras pois ocorreu perda total de fluido a partir dos 107,00 metros.

PB-05	48	65	Houve perda parcial de fluido a 48,00 metros. Houve perda total de fluido a 58,00 metros , sendo perfurado até 65,00 metros sem circulação .	* Sem retorno de amostras pois ocorreu perda total de fluido a partir dos 58,00 metros. Obs.: Isalterito/ carbonatito , acinzentado, composto por magnetita .
PB-06	38	45	-	Isalterito/ carbonatito , castanho amarelado, friável , com apatita fina.
	45	62	-	Isalterito/ carbonatito com pequeno intervalo de silexito, amarelado, semi-compacto.
PB-07	58	64	Houve perda parcial de fluido a 58,00 metros.	Isalterito/ carbonatito , amarelo esverdeado, com piroxênio e magnetita , argilo-arenoso .
	64	65	Houve perda total de fluido a 64,00 metros , retornando circulação aos 65,00 metros.	Isalterito/ carbonatito , amarelado, argilo-arenoso .
PB-08	67.5	71	Houve perda total de fluido a 67,50 metros , retornando a circulação após alguns minutos de injeção de fluido.	Isalterito/ carbonatito , castanho amarelado, alterando entre friável e semi-compacto.
	71	75	Houve perda total de fluido a 71,00 metros , sendo perfurado até 75,00 metros sem circulação .	* Sem retorno de fluido e de amostra.
PB-09	47	48	Houve perda total de fluido a 47,00 metros , sendo perfurado até 48,00 metros sem circulação .	Isalterito/ carbonatito , castanho amarelado, friável (magnetititos) . Obs.: 447 - 48m - Sem retorno de fluido e de amostra.
PB-10	29	48	Maior esforço de avanço na perfuração	Isalterito/ carbonatito marrom, com pequenas camadas de silexito ao meio.
PB-11	95	190	*Durante a perfuração praticamente não foi utilizado bentonita, considerando que a argilosidade da litologia incorporava junto ao fluido aumentando assim a viscosidade	Isalterito/ bebedourito , castanho amarelado, levemente argiloso, friável , com presença de magnetita a partir dos 110 metros.
	190	222		Isalterito/ bebedourito , castanho amarelado, com níveis métricos de magnetitito .
PB-12	21	71	Ocorreram perdas parciais de fluido a 21 e 71 metros.	Intercalações de Isalterito, carbonatito e bebedourito, com camada inicial de aloteritos e foscrete.
PB-13	34	41	Ocorreram perdas parciais de fluido a 34, 37 e 41 metros.	Intercalações de Isalterito, Carbonatito e

	56	56.5	Ocorreu perda total de fluido 56 metros.	Bebedourito, com camada inicial de aloteritos.
PB-14	3	53	-	Carbonatito /bebedourito, cinza média a claro, com trechos com muita magnetita .
PB-15	71	77	Houve perda parcial de fluido no intervalo entre 71 e 77 metros.	Intercalações de Isalterito, Carbonatito e Bebedourito, com camada inicial de aloteritos e foscrete .
PB-16	0	92	-	0.00 a 90.50 - Intercalações de Isalterito, Carbonatito e Bebedourito, com camada inicial de aloteritos; 91.00 a 92.00 - Rocha de coloração mais acinzentada, coesa.
PB-17	104	121	Ocorreu perda parcial de fluido aos 104 e 121 metros.	Isalterito/ carbonatito , gradando de castanho arroxeado a castanho amarelado, alterando entre friável e semi-compacto.
PB-18	0	104	-	0.00 a 102.00 - Isalterito/ carbonatito com pequeno intervalo de silexito, amarelado, semi-compacto; 102 a 104 - Carbonatito são, coloração esbranquiçada.
PB-20	107	111.4	Ocorreu perda total de fluido aos 107,00 metros e o material estava desmoronando, vindo a entulhar o Poço até aos 50 metros de profundidade	Isalterito/ carbonatito , amarelo esverdeado, com piroxênio e magnetita , argilo-arenoso .
	111.4	160	Ocorreu nova perda total de fluido 111,40 metros.	* Sem retorno de amostras (perda total de fluido).
PB-21	40	80	-	40 a 80 - Canga aloterítica, coloração acastanhada
	119	124	-	119 a 124 - Foscrete isalterítico, oxidado, castanho claro a acinzentado.
	140	148	-	140 a 148 - Foscrete isalterítico, oxidado, castanho claro a acinzentado.
PB-22	34	43	-	34 a 43 - Carbonatito isalterítico, oxidado, castanho amarronado.
PB-23	43	46	-	43 a 45 - Quartzito levemente com matriz argilosa, levemente alterado.
	45	150	-	45 a 150 - Quartzito cinza esverdeado.

PB-24	9	26	-	9 a 26 - Isalterito alaranjado, friável .
	26	33	-	26 a 33 - Carbonatito , coloração cinza escuro a preto.
	33	114.52	-	33 a 114.52 - * Sem retorno de amostras.
PB-25	54	60	Houve perda total de fluido a 54,00 metros , retornando à circulação posteriormente.	Isalterito/ carbonatito com pequeno intervalo de silexito, amarelado, semi-compacto.
	64	65	Aos 64,00 metros houve perda total de fluido , sendo que aos 65,00 metros foi constatada a rocha sã.	Carbonatito são, coloração esbranquiçada.
PB-26	34	40	Houve perda parcial de fluido a 34,00 metros, aumentando nos 40,00 metros (perda de aproximadamente 18 m³ de fluido).	Magnetitito muito fino, levemente argiloso, cinza escuro.
	40	56	-	40 a 56 - Magnetitito médio, cinza escuro, com poucos finos ao meio.
PB-27	114	139	Ocorreu perda total de fluido aos 114,00 metros, onde ocorreu desmoronamento, entulhando o Poço até os 58,00 metros	Isalterito/ carbonatito , amarelo esverdeado, com piroxênio e magnetita, arenoso .
	139	165	Ocorreu outra perda total aos 139,00 e 165,00 metros, onde não foi possível avançar a perfuração devido a novos desmoronamentos.	Isalterito/ carbonatito , castanho amarelado a médio, silto-arenoso .
PB-28	166	177	Dos 166 aos 177 metros ocorreu perda parcial de fluido.	Isalterito/ carbonatito , amarelo esverdeado, com piroxênio e magnetita, arenoso .
	177	191	Aos 177 metros ocorreu perda total de fluido , sendo perfurado, portanto, até 191 metros sem retorno.	* Sem retorno de amostras (perda total de fluido).
	191	210	-	Isalterito/ carbonatito , amarelo esverdeado, com piroxênio e magnetita, argilo-arenoso .
	210	224	-	Carbonatito , castanho esverdeado, com piroxênio, arenoso .
	224	226	-	* Sem retorno de amostras (perda total de fluido).
PB-29	40	45	Ocorreu perda total de fluido aos 45,00 metros , não havendo, portanto, recuperação das amostras a partir deste ponto.	Isalterito/ carbonatito , amarelo esverdeado, com piroxênio e magnetita, arenoso .
	45	105.1	-	* Sem retorno de amostras (perda total de fluido).
PB-30	30	40	-	30 a 40 - Isalterito/ carbonatito , castanho

			claro, com piroxênio e magnetita, arenoso.
40	45	-	40 a 45 - Isalterito/ carbonatito , amarelado, argilo-arenoso.
45	80	-	45 a 80 - Intercalação de Isalterito/ carbonatito o, castanho esverdeado, arenoso.
80	102.5	-	80 a 120.5 - Isalterito/ carbonatito , amarelo esverdeado, com piroxênio e magnetita, arenoso.

Fonte: Autor, 2024.

A partir da compilação das informações gerais disponíveis (modelo geológico, descrição geológico-geotécnica, pontos de atenção durante a instalação dos poços e suas respectivas vazões, cava atual e final), foram geradas várias seções, afim de identificar os lineamentos das vazões de água em profundidade e o delineamento da setorização hidrogeotécnica da Cava Final (Figura 65). Do mesmo modo, buscou-se correlacionar esses locais com as falhas antes inferidas por Hasui (2010) e nos perfis de geofísica do item 3.3 do presente estudo.

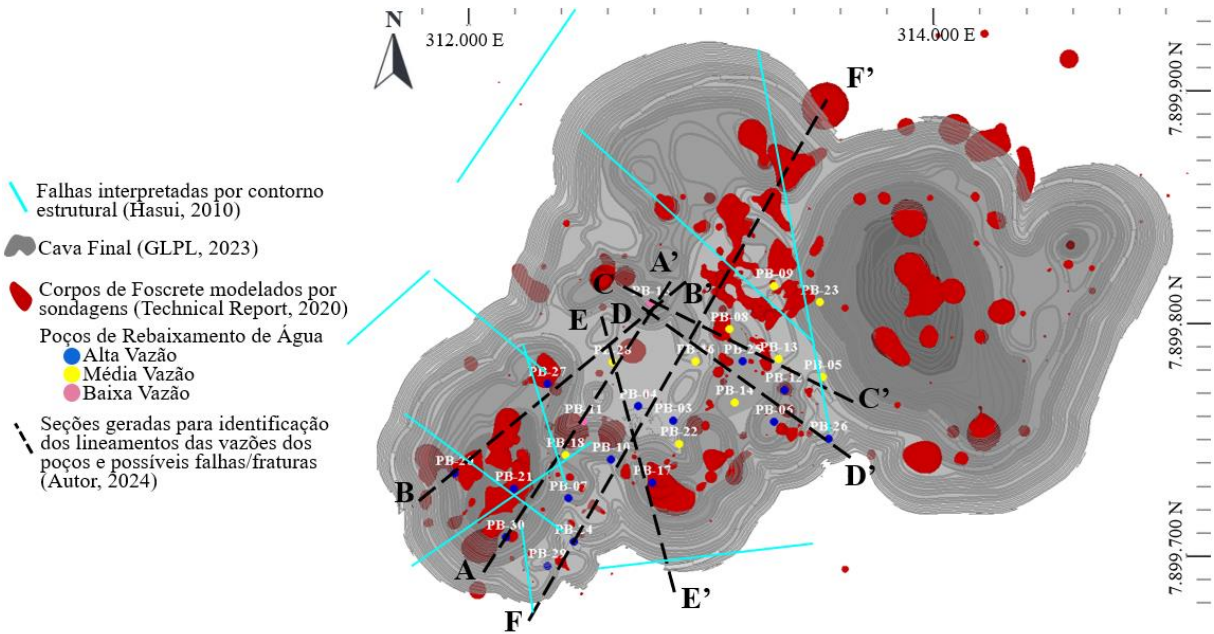


Figura 65 - Mapa de localização das seções para interpretação dos lineamentos das vazões dos poços e delineamento da setorização hidrogeotécnica.
Fonte: Autor, 2024.

Pode-se observar que na Seção A-A' os poços PB-11 e 15 possuem baixa vazão de água durante o bombeamento, pois estão em um horizonte de Bebedourito, mesmo um deles estando

próximo a uma camada de Foscrete e possui duas passagens por magnetitito modeladas por sondagens (PB-11). Já o PB-30 adentrou pouco pelo Foscrete, não sendo perceptível na descrição tátil-visual em campo. Também não houve perda total de fluido durante a implantação, mas é mencionado que estão na região de magnetita e o carbonatito é argilo-arenoso a arenoso (Figura 66), ou seja, material com fração granular e muito mais permeável que os demais horizontes litológicos acima da rocha sã. Interessante que na região do PB-11 e 28 há uma deflexão abrupta no topo rochoso de cerca de 300 metros, sendo ela toda em manto de intemperismo com um material predominantemente argiloso.

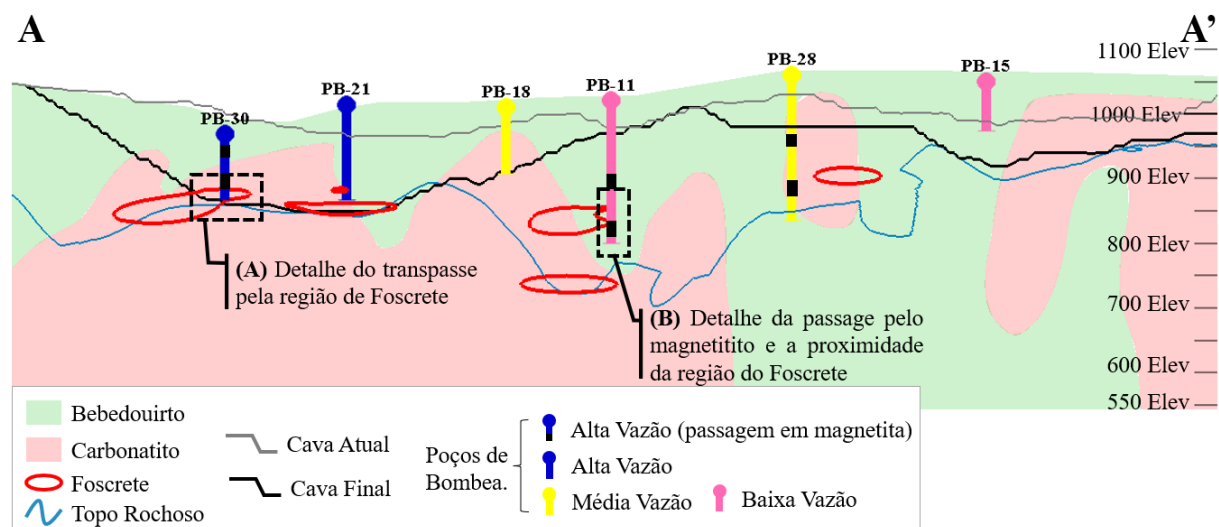


Figura 66 - Detalhe dos poços com alta vazão de água nas regiões de Carbonatito e sua proximidade dos corpos isolados de Foscrete (A). Poços de baixa vazão, contidos no Bebedourito, mesmo um deles estando próximo a um corpo de Foscrete (B).

Fonte: Autor, 2024.

Na Seção B-B', nota-se que durante a implantação dos poços PB-20 e 27 houve a perda total dos fluidos ao interceptar o Foscrete, a mais de 150 metros de profundidade e ambos os poços interceptaram um corpo de magnetitito arenoso a cerca de 100 metros, bem próximo ao Foscrete, demonstrando assim uma possível dissolução do Carbonatito nestas regiões mais permeáveis. Importante também, ressaltar que a Cava Final possui interferências com essas áreas de materiais granulares e de alta vazão de água, são locais que podem trazer complicações operacionais e muito possivelmente riscos geotécnicos, devido a “desconfinamento” dos taludes e as grandes surgências e zonas de saturações nas faces deles (Figura 67).

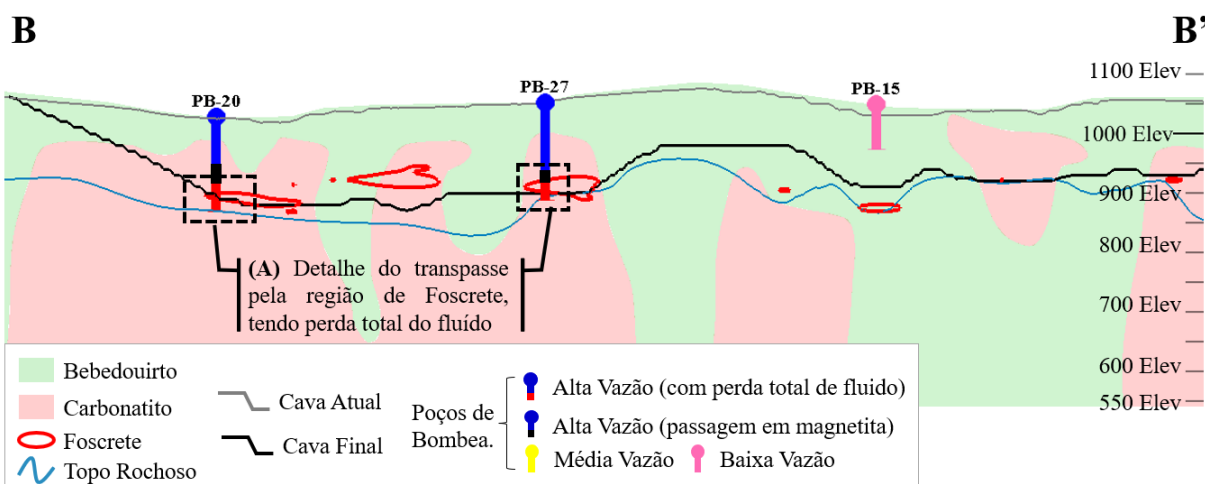


Figura 67 - Detalhe da perda total de fluido ao interceptar os corpos de Foscrete, no horizonte de Carbonatito e essas regiões estarem “conflitando” com os taludes da Cava Final.

Fonte: Autor, 2024.

Nota-se na Seção C-C' (Figura 68), que de maneira geral houve uma perda total de fluido nos poços de alta vazão, mais especificamente na Rocha Sã (material alterando entre friável a semi-compacto). O PB-05, assim como o PB -27 (Seção B-B'), demonstra o magnetitito bem próximo ao um copo de Foscrete, também evidenciando uma possível dissolução devido a litologia do material nesta região. No PB-08, além da passagem pelo Foscrete tem uma proximidade com os taludes da Cava Final. Importante observar que o PB-15 está no horizonte de Bebedourito e os demais poços com melhor vazão, no Carbonatito.

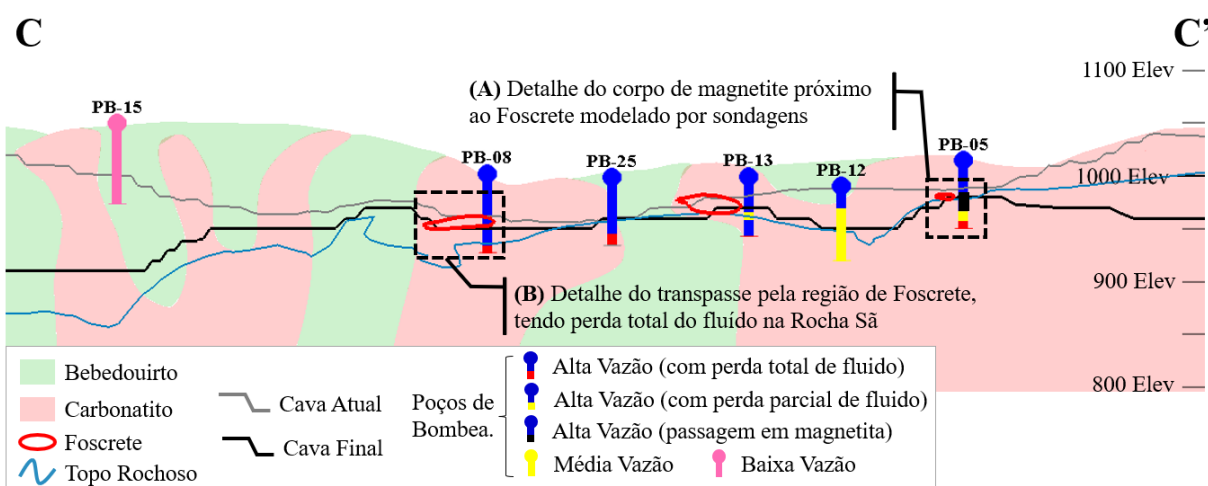


Figura 68 - Detalhe do corpo de magnetitito próximo ao Foscrete modelado por sondagens (A). Detalhe da perda total de fluido ao interceptar a Rocha Sã, próximo ao corpo de Foscrete e no horizonte de Carbonatito (B). Essas regiões estão próximas aos taludes da Cava Final.

Fonte: Autor, 2024.

Ao avaliar a Seção D-D' (Figura 69), pode-se observar no PB-16 que houve perda total do fluido no horizonte de Foscrete e Carbonatito. Para o PB-12, ocorreu perda parcial também

no Foscrete entre o contato de Carbonatito e Bebedourito (normalmente entre diferentes contatos litológicos, pode gerar “zonas de fraquezas” e/ou condutos preferenciais de percolação de água). Interessante notar também para os PB’s 14 e 26 a interceptação de corpos de magnetitito em considerável extensão, sendo eles com fração fina a média.

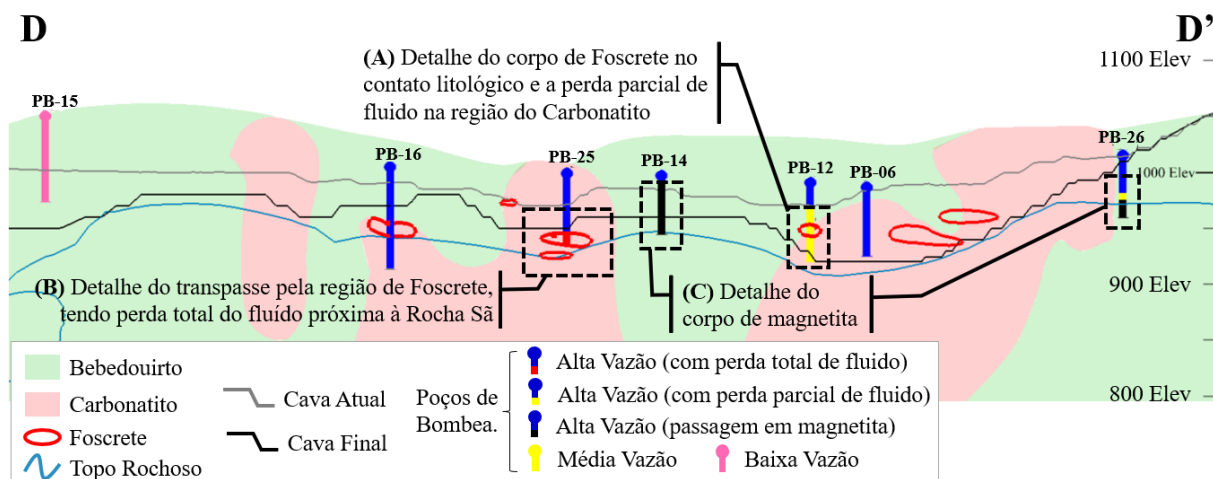


Figura 69 - Detalhe do corpo de Foscrete entre contatos litológicos (A). Detalhe da perda total do fluido na passagem pelo Foscrete no horizonte de Carbonatito (B). Detalhe dos corpos de magnetitito em profundidade.

Fonte: Autor, 2024.

A Seção E-E' (Figura 70), demonstra uma perda parcial de fluido na região do PB-17, bem na região de contato do Carbonatito e Rocha Sã, trazendo a possibilidade da ocorrência de um processo de dissolução, isso podendo ser associado a uma zona de “fraqueza”, devido a diferença de intemperismo destas litologias e, conseqüentemente maior condutividade hidráulica. Para o PB-28, nota-se que mesmo não havendo Foscrete mapeado, possui uma lente de Magnetitito que pode ter contribuído para que houvesse uma perda parcial e total de fluido nesta região durante a etapa de implantação deste poço de rebaixamento de água.

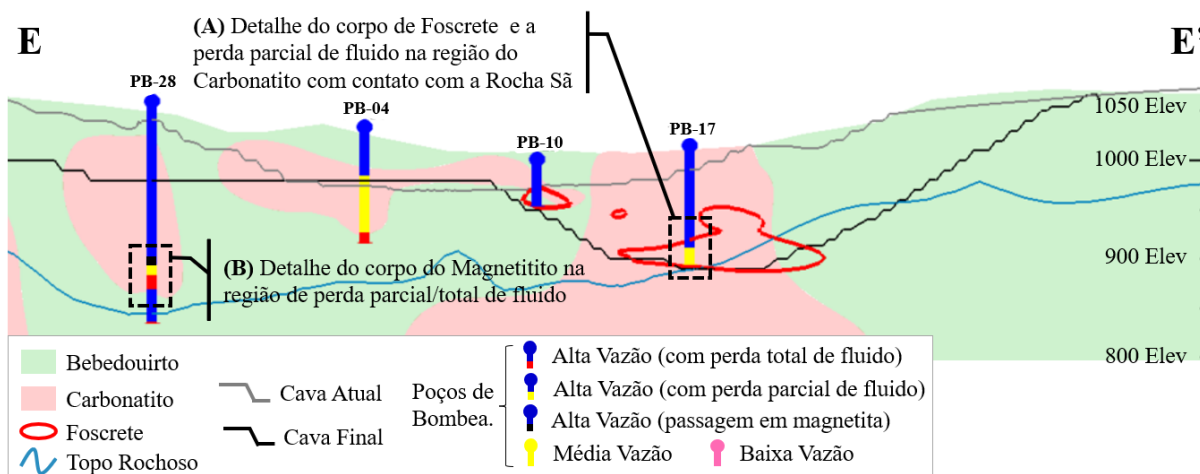


Figura 70 - Detalhe do corpo de Foscrete e a perda parcial de fluido na região do Carbonatito com contato com a Rocha Sã (A). Detalhe do corpo do Magnetitito na região de perda parcial/total de fluido do PB-28 (B).

Fonte: Autor, 2024.

A Seção F-F' (Figura 71), demonstra uma relação interessante no Magnetitito mapeado nos poços PB-07 e 29, no que tange a passagem por este material antes de ter a perda parcial e/ou total do fluido utilizado no avanço do furo para a instalação dos poços de rebaixamento de água. No PB-04, observa-se que houve perda total do fluido ao ter-se o transpasse entre os contatos de Carbonatito e Bebedourito.

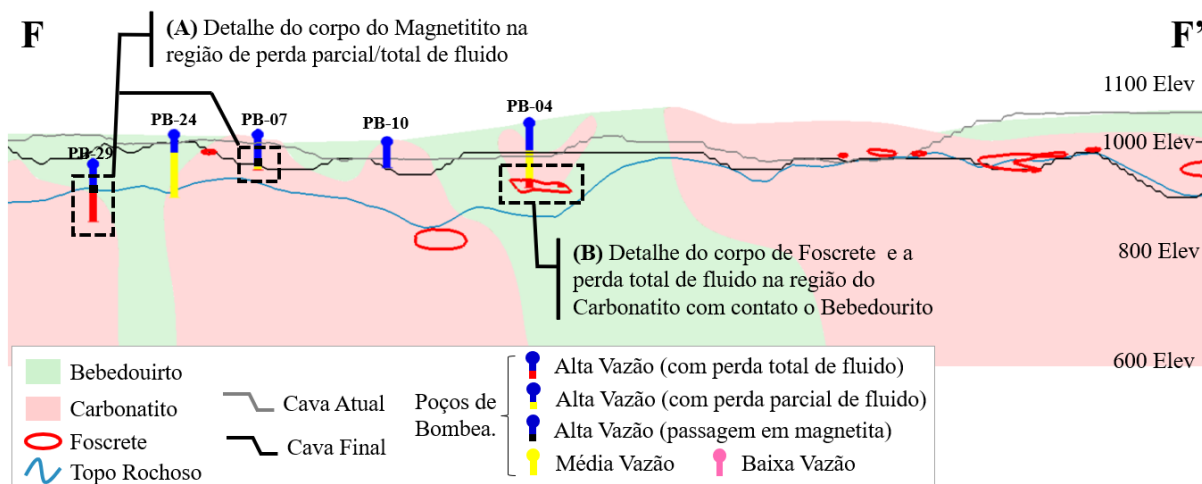


Figura 71 - Detalhe do corpo do Magnetitito na região de perda parcial/total de fluido nos PB-07 e 29 (A). Detalhe do corpo de Foscrete e a perda total de fluido na região do Carbonatito com contato o Bebedourito (B).

Fonte: Autor, 2024.

Através das compilações das seções dos poços de rebaixamento de água e suas descrições geológico-geotécnicas durante a implantação (A a F), modelo geológico, Cava Atual e Final, foi possível elaborar o Mapa de Setorização Hidrogeotécnica (Figura 72). Este levou

em consideração as informações das vazões dos poços, influência dos corpos de Foscrete e Magnetitito “aflorando” na face do talude da Cava Final, assim como as profundidades máximas a serem alcançadas pelo Plano de Lavra de Longo Prazo.

O delineamento da Setorização Hidrogeotécnica foi modelado todo em 3D, buscando sempre a intersecção os materiais mais porosos e permeáveis do modelo geológico-geotécnico (Magnetitito e Foscrete), assim como *trend* das vazões dos poços de rebaixamento de água, levantamento geofísicos e litologias que possuem menor resistência ao cisalhamento, como por exemplo a turfa, presente na paleolagoa e no caminhamento do leito do córrego Bebedouro.

Importante ressaltar que zonas que possuem grande fluxo de água percolando para “fora” do talude, associados aos corpos de Magnetitito, Foscrete e Flogopitito Alterado, podem trazer grandes complicações operacionais, assim como o risco de ruptura do talude local ou global da mina. Visto que a “força de percolação/arraste de água” condiciona entre os grãos do solo uma força de empuxo em sentido à face do talude (região “desconfinada/lavrada”). Com isso pode haver redução do parâmetro de resistência dos solos e, conseqüentemente a instabilização deste(s) banco(s).

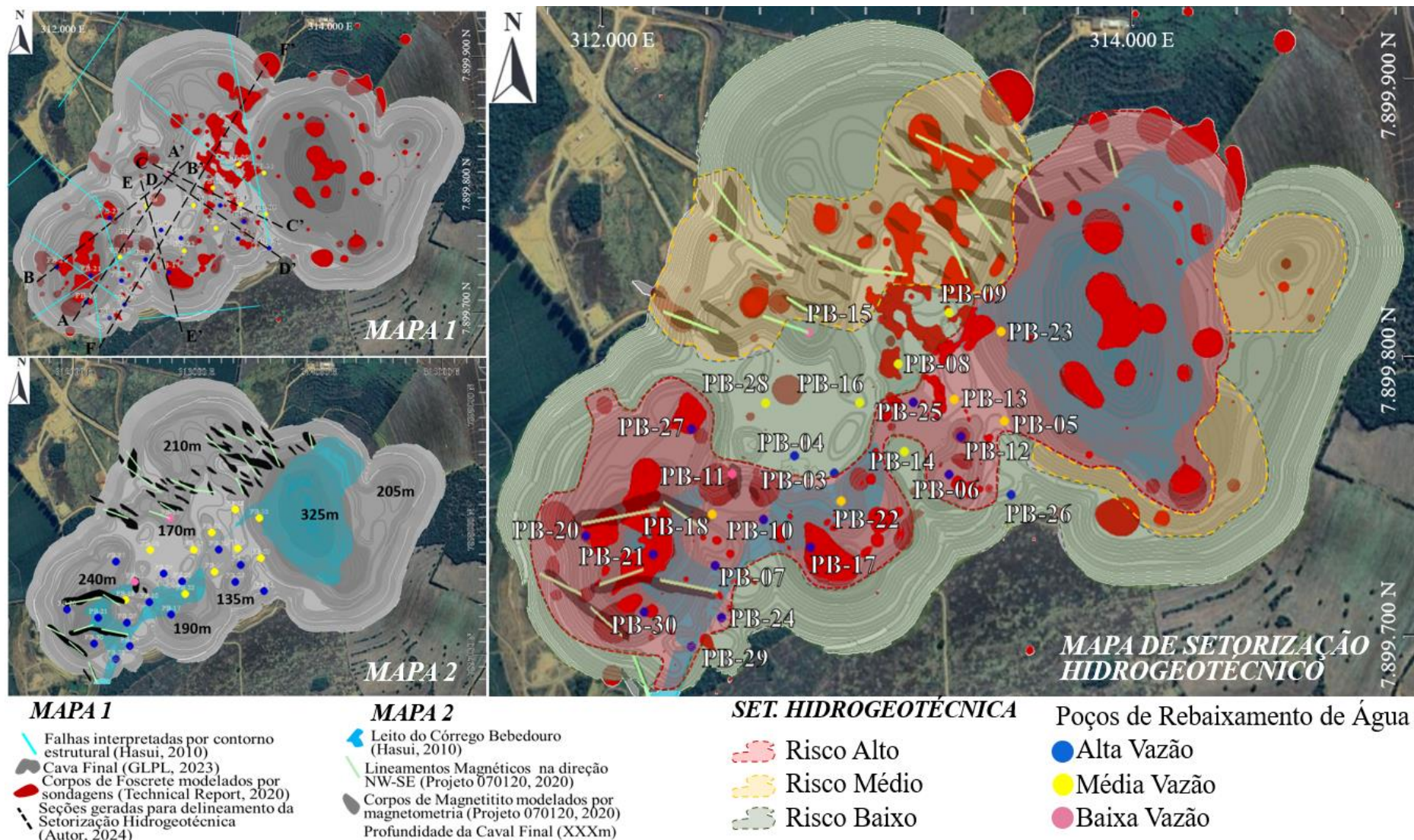


Figura 72 - Mapa de Setorização Hidrogeotécnica da Cava Final e falhas/fraturas interpretadas por estudos anteriores.

Fonte: Autor, 2024.

4. CONCLUSÕES

Na área de estudo, as estruturas rúpteis mapeadas predominam nas direções NW-SE e NE-SW. O mapeamento no manto saprolítico, junto com levantamentos de sensoriamento remoto e geofísica anteriores, confirma a presença dessas estruturas expostas na mina. Em escala regional, as estruturas NW-SE, associadas ao alinhamento das intrusões ígneas de Serra Negra e Salitre I, II e III, são as mais frequentes. Essas estruturas NW influenciam a drenagem da Cava Leste para a Cava Oeste e estão presentes nos corpos de flogopititos da Cava Sudoeste, onde ocorrem os maiores desafios geotécnicos. Devido às características expansivas dos flogopititos em contato com a água, há risco de rupturas locais ou globais nos taludes. Assim, é essencial realizar modelagem e mapeamento conforme o avanço da lavra.

As estruturas NE-SW também desempenham um papel importante na estabilidade geotécnica, pois estão associadas à percolação de água. O Mapa de Setorização Hidrogeotécnica mostra que esses lineamentos estão relacionados aos corpos de Foscrete e Magnetitito, materiais de menor resistência, que possuem maior quantidade de vazios. Dessa forma, é recomendada a modelagem dos Magnetititos e a análise de estabilidade dos taludes nas áreas saturadas da Cava Final, considerando as altas vazões dos poços de rebaixamento. Esses materiais granulares, por serem pouco coesos, perdem ainda mais resistência em condições de saturação.

Além disso, as estruturas NE-SW coincidem com a direção da drenagem da paleolagoa, área alagável com aquífero de relevância local, e com a calha do Córrego do Bebedouro, que passa pela região da mina. As altas vazões dos poços de rebaixamento confirmam a presença de lineamentos NE-SW associados à calha do Córrego do Bebedouro e aos corpos de Magnetitito e Foscrete em regiões de contato, o que pode estar relacionado a processos de dissolução por percolação.

A medição de vazão nos poços de rebaixamento, juntamente com a interpretação dos perfis de eletrorresistividade, evidenciou condições favoráveis ao fluxo hídrico em subsuperfície, como no PB-09 e na linha de geofísica L-5 (Figura 56). Essas condições estão associadas à presença de falhas, contatos geológicos com permeabilidade variável, e aos corpos de Foscrete e Magnetitito, que representam condutos preferenciais de fluxo devido à sua porosidade.

Com o conhecimento do comportamento hídrico e estrutural da mina, e considerando que a cava final atingirá profundidades entre 250 e 350 metros, foi possível elaborar o delineamento Hidrogeotécnico. Esse delineamento é fundamental para os estudos de

estabilidade dos taludes e para a definição da Setorização Geotécnica das cavas, tanto a atual quanto a final.

Diante do exposto, recomenda-se realizar a reavaliação da geometria da Cava Final, principalmente nas regiões denominadas “Alto Risco” no mapa de setorização Hidrogeotécnica. Visto que, são áreas de grandes profundidades e algumas regiões possui materiais de baixa resistência, como por exemplo, a paleolagoa e da formação do córrego Bebedouro. Também importante avaliar como irá comportar a estabilidade dos taludes “aflorando” magnetitito, pois são materiais predominantemente arenosos, ou seja, não possuem coesão, e quando saturados, reduzem consideravelmente os parâmetros de resistência do cisalhamento.

Para elevar a robustez nas avaliações futuras, é de suma importância que seja elaborado um modelo 3D litológico. Uma vez que pelo presente estudo, constatou-se que as questões estrutural e litológica ditam o comportamento geotécnico e hidrogeológico da jazida.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, A. D. & PARSONS, A. J. 1994. *Geomorphology of desert environments*. London: Chapman and Hall, 674-674 pp.

AMARAL, G., BUSHEE, J., CORDANI, U.G., KAWASHITA, K., REYNOLDS, J.H. 1967. Potassium – argon ages of alkaline rocks from Southern Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31: 117-142.

ANNUAL REPORT. 2020. *Technical Report on the Mineral Resources Estimates for the Patrocínio Phosphate Deposit, Minas Gerais State, Brazil*. p. 9.

AYDIN, A. & SCHULTZ, R. A. 1990. Effect of mechanical interaction on the development of strike-slip faults with en echelon patterns. *Journal of Structural Geology*. Vol. 12, p. 123–129.

BARBOSA, E. S. R., BROD, J. F., JUNQUERIA-BROD, T. C., DANTAS, E. L., CORDEIRO P. F. O., GOMIDE, C. S. 2012. Bebedourite from its type area (Salitre I Complex): a key petrogenetic series in the Late-Cretaceous Alto Paranaíba kamafugite-carbonatite-phoscorite association, Central Brazil. *Pontificia Universidad Católica de Chile*.

BARBOSA, E. S. R. 2012. Mineralogia e Petrologia do Complexo Carbonatítico-Foscorítico

de Salitre, MG. Tese de Doutorado. **Instituto de Geociências**. Universidade de Brasília.

BARBOSA, E. S. R., BROD, J. F., CORDEIRO, P. F. O., JUNQUERIA-BROD, T. C., SANTOS, R. V., DANTAS, E. L. 2020. Phoscorites of the Salitre I complex: Origin and petrogenetic implications. **Chemical Geology**, v. 535.

BARTON, N. 2006. Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy. **Taylor and Francis Group, London**. p. 1-23.

BORGES, M. E. 2018. Estudo da Deformação Rúptil no Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre I. Monografia. Curso de Engenharia de Minas. **Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG**.

BENSE, V. F., GLEESON, T., LOVELESS, S. E., BOUR, O. SCIBEK, J. 2013. Fault zone hydrogeology. **Earth-Science Reviews**. 127.

BROD, J. A., RIBEIRO, C. C., GASPAR, J. C., JUNQUEIRA-BROD, T. C., BARBOSA, E. S. R., RIFFEL, B. F., SILVA, J. F. da. CHABAN, N., FERRARI, A. J. D., 2004. Geologia e mineralizações dos Complexos Alcalino-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. Excursão 1. In: SEER, H.J. (org), Guia de Excursões, **Anais 42 Congresso Brasileiro de Geologia**, Araxá, 2004, Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo Minas Gerais, p 1-32, 2004.

BROD, J. A., RIBEIRO, C. C., GASPAR, J. C., JUNQUEIRA-BROD, T. C., BARBOSA, E.S.R. RIFFEL, B. F., SILVA, J. F., CHABAN, N. Geologia e Petrologia dos complexos alcalinos de Araxá, Tapira e Catalão. In: **Anais 42 Congresso Brasileiro de Geologia**, 2004, Araxá, MG. Programa oficial, 2004. p. 112.

CASTILHO, L. & ABRIL, W. F. 2015. Surface Geophysical Methods (Ground Penetrating Radar - GPR, and Magnetometry) Application. In: **3rd Latin American Geosciences Student Conference**. Niterói, Brazil.

CEFET. 2019. Mapeamento Estrutural e Estudo Geotécnico e Hidrogeológico - Mineradora. **Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG**. Araxá, Brasil.

CHABAN, N., GONÇAVES, R., PAVESI, F. M. 2001. *Mapa Geológico do Domo de Salitre (desenho - S-DE-1000-22-003-00)*.

CMP18MNRT02-R2 – RELATÓRIO TÉCNICO. 2018. Avaliação das Trincas da Cava Leste. *Mineradora*.

CODEMIG. 2004. *Portal da Geologia*. Disponível em: <<http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/#col-form-download-tab>>. Acesso em: 21/05/2024.

COWIE, P. A., SORNETTE, D., VANNESTE, C. 1995. Multifractal scaling properties of a growing fault population. *Geophysical Journal International*. Vol. 122, p. 457–469.

DARDENNE, M. A. 2000. The Brasília fold belt. In: *Anais 31 International Geological Congress*, 2000, Rio de Janeiro. Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro: SGB, p. 231- 263.

DARDENNE, M. A. & SCHOBENHAUS, C. 2001. O Escudo do Brasil Central. In: *Metalogênese do Brasil. Ed.Univ. Brasília/CPRM*, Brasília, pp.: 46-105.

DEERE, D. U. 1989. Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years. *National Technical Information Service*. Gainesville, Florida. 22 p.

E-GEO. 2009. Seções Geológica-geotécnicas Interpretadas Através da Descrição de Testemunhos de Sondagem Diamantada – Produto 26. *Mineradora*.

FOSSEN, H. 2012. Capítulo 8: Falhas. In: *Geologia Estrutural*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 203-246.

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

GLOVER, P. W. J. 2015. Geophysical Properties of the Near Surface Earth: Electrical Properties. In: **Schubert, G., Editor-in-Chief, editor**. Treatise on Geophysics. 2. Elsevier; The Netherlands: p. 5604.

GROCHOWSKI. J., KUCHENBECKER. M., BARBUEN. D., NOVO. A. T. 2019. Integrating geological and airborne geophysical data to review the cartography of Rio Itanguá Batholith, Araçuaí Orogen, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**.

GERÊNCIA DE PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO (GPLP) 2019. Relatório de Campanha de Sondagem. **Mineradora**.

HASUI, Y.; CORDANI, U. G. 1968. Idades Potássico-Argônio de rochas eruptivas mesozóicas do oeste mineiro e sul de Goiás. In: **Anais 22 Congresso Brasileiro de Geologia**, p. 139-143.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R; COIMBRA, A. M. 1975. The Ribeira Folded Belt. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 5, p. 257-266.

HASUI, Y. 2007. Investigação das Falhas na Área do Projeto Salitre. Relatório, **Mineradora**.

HASUI, Y. 2009. Modelo Geológico da Bacia Sedimentar da Área do Projeto Salitre. Relatório, **Mineradora**.

HASUI, Y. 2010. Macro-estruturação da Área da Mina de Salitre. Relatório, **Mineradora**.

HESTHAMMER, J., FOSSEN, H. 2000. Uncertainties associated with fault sealing analysis. **Petroleum Geoscience**. Vol. 6, p. 37–45.

HOLBROOK, W.S., RIEBE, C.S., ELWASEIF, M., HAYES, J.L., HARRY, D. L., BASLER-REEDER, K., MALAZIAN, A., DOSSETO, A., HARTSOUGH, P. C., AND HOPMANS, J. W. 2014. Geophysical constraints on deep weathering and water storage potential in the Southern Sierra Critical Zone Observatory. **Earth Surface Processes and Landforms**. Vol. 39, p. 366–380.

IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acesso em: 21/05/2024.

ISRM. 1978. ISRM Blue Book: The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-206. *Edited by R. Ulusay and J.A. Hudson. ISRM.*

JÁCOMO, M., H. 2010. Associação de Magnetometria, Gamaespectrometria, Geoquímica e Petrografia para Modelamento Tridimensional da Mineralização de Nióbio do Depósito Morro do Padre, Goiás, Brasil. Dissertação de Mestrado, *Instituto de Geociências*, Universidade de Brasília.

JACQUES. D. P., MACHADO. R., OLIVIERA. G. R., FERREIRA. F. J. F., CASTRO. G. L., NUMMER. R.A. 2014. Correlation of lineaments (magnetic and topographic) and Phanerozoic brittle structures with Precambrian shear zones from the basement of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, p. 39-54.

KNIPE, R. J. 1997. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. Vol. 81, p. 187–195.

KNOTT, S. D., BEACH, A., BROCKBANK, P. J., BROWN, J. L., MCCALLUM, J. E., WELBON, A. I. 1996. Spatial and mechanical controls on normal fault populations. *Journal of Structural Geology*. Vol. 18, p. 359–372.

LEBEDEVA, M. I., BRANTLEY S. L. 2013. Exploring geochemical controls on weathering and erosion of convex hillslopes: beyond the empirical regolith production function. In: *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 38, p. 1793–1807.

LEWIS. D. F., SLATER. D. L., ROBINSON. J., JOHNSON. D. C., WERKEMA. D. 2018. An overview of geophysical technologies appropriate for characterization and monitoring at fractured-rock sites. *EPA Public Access*.

LONG, J. C. S., KARASAKI, K., DAVEY. A., PETERSON, J., LANDSFELD, M., KEMENY, J., MARTEL, S. 1991. An inverse approach to the construction of fracture hydrology models

conditioned by geophysical data: An example from the validation exercises at the Stripa Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 28, p. 121–142.

MAHER, K., CHAMBERLAIN. 2014. Hydrologic Regulation of Chemical Weathering and the Geologic Carbon Cycle. *Science*. Vol. 343, p. 1502-1504.

MDGEO. 2023. Relatório de Atualização dos Estudos Hidrogeológicos e Hidrológicos do Complexo Minerário. *Mineradora*.

MENEZES, A. D., CARNEIRO, C. C. R., MEIRELES, P. B. 2019. Map of the Potential Geotechnical Susceptibility for Operational Pit Slopes. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. *Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas – DEMIN* - Ouro Preto - Minas Gerais – Brasil, 57 P.

MONTICELLI, J. P. 2019. Weathering study of the gneissic rock mass from the Monte Seco tunnel region, southeastern Brazil. Dissertação de Mestrado. *Escola Politécnica*, USP, 154p.

MORAES, L.C., SEER, H. J., BENTO, J. H. B., LEAL, C. F., MADEIRA, M. R. 2008. Análise 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. *Anais 4 Simpósio de vulcanismo e ambientes associados*. Foz do Iguaçu, PR. Anais.

NASCIMENTO, E., L., C. 2018. Geologia, Geoquímica e Mineralogia do Complexo Carbonatítico Morro Preto – GO. Tese de Doutorado, *Instituto de Geociências*, Universidade de Brasília.

NEOGEO. 2018. Levantamento Geofísico Terrestre em Área de Cava com Utilização de Eletorresistividade (CE) e *Ground Penetrating Radar* (GPR). Relatório Técnico, *Mineradora*.

NUR, A., SIMMONS, G. 1969. The effect of saturation on velocity in low porosity rocks. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 7, p. 183-193.

OWEN, R., MAZITI, A., DAHLIN, T. 2007. The relationship between regional stress field,

fracture orientation and depth of weathering and implications for groundwater prospecting in crystalline rocks. *Hydrogeology Journal*. Vol. 15, p. 1231-1238.

PALMSTRÖM, A. 2001. In-Situ Characterization of Rocks. In: *Chapter 2 of the book: Measurement and Characterization of Rock Mass Jointing*. V.M. Sharma and K.R. Saxena.

PEACOCK, D. C. P., SANDERSON, D. J. 1996. Effects of propagation rate on displacement variations along faults. *Journal of Structural Geology*. Vol. 18, p. 311–320.

PELLS, P. J. 2017. *Rock quality designation (RQD): time to rest in Peace*. Doi: dx.doi.org/10.1139/cgj-2016-0012. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 54.

PENA, M. A. C., VELÁSQUEZ, L. N. M., TEIXEIRA, G. M. SILVA, P. H. P., AMARAL, D. G. P., DE PAULA, R. S. 2019. Análise de lineamentos e sua relação com a capacidade específica de poços na APA cárste de Lagoa Santa, MG. In: *Anais VI – Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo*.

PLACE., J., GERAUD., Y., DIRAISON., M., HERQUEL., G., EDEL., J., B., BANO., M., LE GARZIC., E., WALTER., B. Structural control of weathering processes within exhumed granitoids: compartmentalisation of geophysical properties by faults and fractures. *Journal of Structural Geology*. 2016.

PRODUTO 17. 2009. Produto 17_Salitre_Cava_Localização de investigações. *Mineradora*.

PRO-0920-000-007-01-06 – PROCEDIMENTO OPERACIONAL. 2020. Descrição Geotécnica de Testemunhos de Sondagem. *Mineradora*.

READ, J.& STACEY, P. 2009. Guidelines for open pit slope design. Netherlands: *CSIRO Publishing and CRC*, 496p.

RECHES, Z.& LOCKNER, D.A. 1994. Nucleation and growth of faults in brittle rocks. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 99, p. 18159–18174.

RELATÓRIO PARCIAL – PROJETO 070120. 2020. Magnetometria Terrestre: Aquisição, Processamento e Interpretação. **Mineradora.**

RELATÓRIO TÉCNICO - VG15-144-1-EG-RTE-0001. 2016. Reavaliação do Modelo Estrutural da Cava. **Mineradora.**

REMPE, D. M. & DIETRICH, W. E. 2014. A bottom-up control on fresh-bedrock topography under landscapes. In: ***Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America***. Vol. 111, p. 6576–6581.

RIBEIRO, C. G., VELÁSQUEZ, L. M. N., DE PAULA, R. S., MEIRELES, C. G., LOPEZ, N. H. B., ARCOS, R. E. C., AMARAL, D. G. P. 2019. Análise dos fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. ***Águas Subterrâneas***, v.33, n.1, p.12-21.

RIBEIRO, H. J. P. S. 2001. ***Estratigrafia de Sequências – Fundamentos e Aplicações***. São Leopoldo, Rio Grande do Sul. Ed. Unisinos. 428p.

ROBINSON, S., MICHAUD, Y. 1999. Ground penetrating radar. In: ***Handbook of Geophysical Techniques for Geomorphic and Environmental Research***. Gilbert, B. Editor, Open file 3731, Geological Survey of Canada, p. 69-102.

SÁ, H. & ELIS, V.R. 2016. Aplicação de Imageamento Elétrico Multi-eletrodos para Auxílio na Locação de Perfuração de Poços Tubulares – Estudo de Casos em Aquíferos Cristalinos. In: ***VII Simpósio Brasileiro de Geofísica***. Ouro Preto, MG.

SANTOS, A., F. 2023. Análise Bidimensional e Tridimensional de Estabilidade Geotécnica de Cava de Mineração. Dissertação de Mestrado. **Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG.**

SEER, H. J. 1999. Evolução tectônica dos grupos Araxá, Ibiá e Canastra na Sinforma de Araxá, Araxá/MG. Tese de Doutorado, **Instituto de Geociências**, UNB, 268p.

SILVA, L.F. 2008. Geologia estrutural e geoquímica aplicados ao estudo do aquífero localizado na área do Complexo Mínero-industrial (URA/INB) de Caetité, Bahia. Monografia de Graduação, **Instituto de Geociências**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 70 p.

SILVA, L.F. 2015. Modelo conceitual do aquífero fraturado da área da Jazida de Urânio de Caitité, Bahia: Implicações para o fluxo subterrâneo. Dissertação de Mestrado, **Instituto de Geociências**, Universidade de Brasília. 130p.

SHIMIZU, V. K. 2012. Classificação e Caracterização de Tipos de Minérios de Cobre da Mina do Sossego – Região de Carajás. Dissertação de Mestrado. **Politécnica da Universidade de São Paulo**.

SOUZA, A. E. & FONSECA, D. S. Fósforo. **DNPM**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>>. Acesso em: 26/07/2024.

TECHNICAL REPORT ON THE MINERAL RESOURCES ESTIMATES FOR THE PATROCÍNIO - Phosphate Deposit, Minas Gerais State, Brazil. **Mineradora**, julho de 2020.

ULIANA, D. 2010. **Caracterização Tecnológica do Minério de Fósforo do Complexo Alcalino de Salitre, MG**. São Paulo, 210 p.