

**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

**Análise da estabilidade de taludes de mineração a partir de
parâmetros estáticos e dinâmicos**

BEATRIZ GUZZO DUZ

**Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

BEATRIZ GUZZO DUZ

**Análise da estabilidade de taludes de mineração a partir de parâmetros
estáticos e dinâmicos**

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira
Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Eduardo Hartwig

Rio Claro - SP
2024

G993a Guzzo Duz, Beatriz
Análise da estabilidade de taludes de mineração a partir de parâmetros estáticos e dinâmicos / Beatriz Guzzo Duz. -- Rio Claro, 2024
174 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: César Augusto Moreira
Coorientador: Marcos Eduardo Hartwig

1. Eletrorresistividade. 2. GPR. 3. Geotecnia. 4. Mineração. 5. Descomissionamento. I. Título.

Impacto potencial desta pesquisa

A presente pesquisa apresentou novas metodologias e ferramentas para identificação de possíveis pontos de ruptura em taludes de mineração, bem como de geração de drenagem ácida, com possibilidade de replicação a outras áreas, como estruturas civis. Tais métodos de investigação auxiliam no processo de melhoria contínua da capacidade tecnológica adotada pelas empresas, conforme proposto pela ODS 8, na gestão e produção sustentável (ODS 12), além da gestão sustentável da água a partir da identificação de possíveis contaminantes, relacionados a ODS 6.

Potential impact of this research

This research presented new methodologies and tools for identifying possible rupture points in mining slopes, as well as the generation of acid drainage, with the possibility of replication in other areas, such as civil structures. These research methods assist in the process of continuous improvement of the technological capacity adopted by companies, as proposed by SDG 8, in sustainable management and production (SDG 12), in addition to sustainable water management based on the identification of possible contaminants, related to SDGs. 6.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

BEATRIZ GUZZO DUZ

Análise da estabilidade de taludes de mineração a partir de parâmetros estáticos e dinâmicos

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira
IGCE/UNESP/Rio Claro - SP

Prof. Dr. Edmo da Cunha Rodovalho
ICT/UNIFAL/Poços de Caldas - MG

Profa. Dra. Livia Portes Innocenti Helene
FATEC-JAHU/Jaú - SP

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
UNIPAMPA/Caçapava do Sul - RS

Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas
UNIPAMPA/Caçapava do Sul - RS

Conceito: Aprovado

Rio Claro - SP, 30 de agosto de 2024

AGRADECIMENTOS

A vida inevitavelmente é um ciclo: ciclos se abrem e se fecham, isso é viver. O fim de cada ciclo nos ajuda a pensar e refletir sobre nossa jornada, nossos feitos e desfeitos. E nesta jornada de quatro anos foram muitas pessoas que contribuíram com ensinamentos que levarei para a vida.

Agradeço primeiramente a minha família por todo suporte e incentivo concedido ao longo destes anos. Ao meu parceiro Felipe, pelo amor, paciência e pelas vibrações a cada conquista.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. César Augusto Moreira, pela sua dedicação que por muitas vezes o fez deixar de lado seus momentos de descanso para me auxiliar nos exaustivos trabalhos de campo e nos inúmeros desabafos e desesperos compartilhados no departamento, no telefone e até mesmo nos cafés preparados pela Fabíola. E, principalmente, obrigada por sempre ter acreditado e depositado sua confiança em mim ao longo de todos esses anos de trabalho.

Ao meu co orientador, Marcos, que não mediu esforços para sempre se fazer presente, mesmo com a distância.

A todos os funcionários da UNESP, em especial a Rosângela (Dona Rô), que me acompanhou desde o mestrado e me fez companhia por vários almoços durante as idas a Rio Claro.

Aos meus amigos, especialmente os que infelizmente não puderam presenciar esta conquista comigo, mas que tenho certeza que me acompanham e mandam boas energias sempre: Aninha e Doug.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O desenvolvimento de minas sem planejamento prévio pode gerar passivos ambientais de alta complexidade e dificultar o processo de descomissionamento. Os empreendimentos mineiros devem assegurar a estabilidade geotécnica de suas instalações, bem como a qualidade química de suas águas. A Mina Osamu Utsumi, localizada no município de Caldas, estado de Minas Gerais foi responsável pela extração de urânio até 1995 e apresenta problemas geotécnicos e químicos na área de cava, com presença de rupturas generalizadas e drenagem ácida. Durante seu processo de abertura foram construídos taludes que desconfinaram e alteraram a geometria do maciço, bem como expuseram a rocha ao intemperismo. A água quando armazenada no interior do maciço faz com que a poropressão aumente e torne o processo de ruptura iminente. A exposição do maciço rochoso com zonas de minério residual e a interação destas com a água pode acarretar na dissolução de íons que quando concentrados geram drenagem ácida. Este trabalho tem como objetivo correlacionar parâmetros estáticos e dinâmicos e sua importância na análise da estabilidade de taludes. Além disso, diante da natureza da rocha presente na área, são identificadas possíveis fontes geradoras de drenagem ácida nos taludes da frente SE da cava. Foram utilizados métodos geofísicos, como GPR, eletrorresistividade e polarização induzida para identificação de zonas de fraturas, presença de água e acúmulo de sulfetos. Esses resultados foram correlacionados com dados obtidos a partir da análise geotécnica visual, litológica e estrutural. Foram obtidos também dados da análise química das águas presentes nos poços de monitoramento. Os resultados mostraram a possibilidade de ocorrência de rupturas planares e em cunha nos taludes, em pontos específicos da frente SE. Zonas de baixa resistividade e atenuação do sinal eletromagnético emitido pelo GPR foram correlacionadas a zonas com acúmulo de água com consequente verificação de ruptura nestes locais. As rupturas são coincidentes ainda com a litologia brechoide, na qual apresenta minério residual e está concentrada no setor central da frente SE. Os altos valores de cargabilidade correlacionados a zonas de fluxo de água foram indicativos de pontos de geração de drenagem ácida, comprovadas pelo baixo valor de pH captado nos poços de monitoramento. São recomendados projetos de sistema de drenagem na cava e reconformação topográfica dos taludes com eliminação de zonas de minério residual a fim de garantir que a estabilidade geotécnica e a qualidade das águas presentes na cava estarão em conformidade a legislação.

Palavras-chave: geotecnia; GPR; eletrorresistividade; mineração; descomissionamento

ABSTRACT

The development of mines without prior planning can generate environmental liabilities of high complexity and hinder the decommissioning process. Mining enterprises must ensure the geotechnical stability of their facilities as well as the chemical quality of their waters. The Osamu Utsumi Mine, located in the municipality of Caldas, state of Minas Gerais was responsible for the extraction of uranium until 1995 and presents geotechnical and chemical problems in the pit area, with the presence of widespread ruptures and acid drainage. During its opening process, slopes were built that deconfined and altered the geometry of the rock mass, as well as exposed the rock to weathering. The water when stored inside the rock mass causes the increase of the poropressure and makes the rupture process imminent. The exposure of the rock mass with zones of residual ore and the interaction of these with water can lead to the dissolution of ions that when concentrated generate acid drainage. This work aims to correlate static and dynamic parameters and their importance in the analysis of slope stability. In addition, given the nature of the rock present in the area, possible sources of acid drainage are identified on the slopes of the SE front of the pit. Geophysical methods such as GPR, eletrorresistivity and induced polarization were used to identify fracture zones, presence of water and sulfides accumulation. These results were correlated with data obtained from the visual geotechnical analysis, lithological and structural. Data were also obtained from the chemical analysis of the waters present in the monitoring wells. The results showed the possibility of occurrence of planar and wedge ruptures on the slopes at specific points of the SE front. Zones of low resistivity and attenuation of the electromagnetic signal emitted by the GPR were correlated to zones with water accumulation with consequent verification of rupture in these places. The ruptures also coincide with the brechoid lithology, which presents residual ore and is concentrated in the central sector of the SE front. The high chargeability values correlated to water flow zones were indicative of acid drainage generation points, confirmed by the low pH value captured in the monitoring wells. Designs for a drainage system in the pit and topographic reconfiguration of the slopes with elimination of residual ore zones are recommended in order to ensure that the geotechnical stability and the quality of the water present in the pit will comply with the legislation.

Keywords: geotechnics; GPR; eletrorresistivity; mining; decommissioning

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas para determinação da geometria da cava.....	24
Figura 2: Modos de ruptura mais frequentes em taludes	25
Figura 3: Exemplo de ruptura circular ocorrida em Utah/USA.....	26
Figura 4: Condições para ocorrência de rupturas planares.....	27
Figura 5: Ruptura em cunha em: (a) duas famílias de descontinuidades e (b) três famílias de descontinuidades	27
Figura 6: Componentes do fluxo de água em minas a céu aberto	28
Figura 7: Porcentagem de elementos presentes em áreas com drenagem ácida (pH < 5,5) e drenagens naturais (pH > 5,5).....	32
Figura 8: Esquematização do processo de formação da DAM em minerações.	33
Figura 9: Principais efeitos da DAM	34
Figura 10: Técnicas de Remediação da Drenagem Ácida de Mina.....	38
Figura 11: Ciclos de vida do empreendimento mineiro	42
Figura 12: Diferentes tipos de fechamento de mina	43
Figura 13: Vista aérea da Mina de Águas Claras em diferentes anos e projeção futura	48
Figura 14: Parque das Pedreiras a esquerda em 1974, logo após o fechamento da Pedreira Gava e a direita em 2010 com detalhe para a Ópera de Arame.....	48
Figura 15: Vista área da Mina Misima - durante e pós operações	49
Figura 16: A - Mina de caulim em 1995; B - Construção das estruturas em formato de bolhas; C - Projeto Éden finalizado	50
Figura 17: Localização das antigas minas de urânio pertencentes a SDAG WISMUT	51
Figura 18: Operação de preenchimento em antiga cava de urânio.....	52
Figura 19: Localização do Planalto Poços de Caldas e INB	55
Figura 20: Visão geral do complexo da INB com suas principais instalações	56
Figura 21: Principais passivos encontrados na área: A e B - surgência de água nos taludes evidenciada em B pelas manchas de caulinita (branco), C - surgência de água na base da pilha de estéril (BF-04), D – evidências de rupturas generalizadas nos taludes.....	59
Figura 22: Mapa geológico do Planalto Poços de Caldas	60
Figura 23: Sequência evolutiva ilustrativa do Maciço Alcalino Poços de Caldas	61

Figura 24: Mapa geológico da cava da MOU	62
Figura 25: Perfil ilustrativo dos corpos mineralizados "A", "B" e "E"	63
Figura 26: Localização da Unidade de Gerenciamento 6 - GD6 com destaque para o Planalto de Poços de Caldas	64
Figura 27: Hidrografia do Planalto de Poços de Caldas	65
Figura 28 : Localização dos Poços de Monitoramento da INB, destaque na área da cava.....	67
Figura 29: Perfis dos poços de monitoramento localizados na porção sudeste da cava	68
Figura 30: Equipamento GPR e esquematização do seu princípio de funcionamento	72
Figura 31: Modos usuais de aquisição de dados com o GPR	73
Figura 32: Sinal registrado do GPR. O traço azul (<i>wiggle</i>) corresponde a representação gráfica para a visualização do radargrama (escala de cinza). Detalhes de pulsos transmitidos (ar), reflexo da superfície e reflexo nas interfaces	74
Figura 33: (A) Dados brutos obtidos com o GPR (a destacar a faixa branca que representa a superfície), (B) Dados filtrados, (C) Correção de espalhamento geométrico.....	75
Figura 34: Seções GPR obtidas no mesmo local com antenas de diferentes frequências.....	78
Figura 35: Circuito representativo da 2ª Lei de Ohm.....	79
Figura 36: Linhas de corrente elétrica geradas após introdução em superfície	80
Figura 37: Configuração tetraédrica de eletrodos: A-B corrente e M-N tensão	81
Figura 38: Comportamento da tensão ao atingir o valor máximo e seu decaimento após a interrupção de corrente pelo sistema.....	82
Figura 39: Eletrodo não polarizável utilizado no estudo	83
Figura 40: Mecanismos de Polarização Induzida: Polarização de membrana (A) e Polarização de eletrodo (B)	84
Figura 41: Perfis típicos de Rugosidade e Pente de Barton utilizado nas medições.....	86
Figura 42: Relação entre perfis de rugosidade e JRC.....	87
Figura 43: Esquematização da ocorrência da ruptura planar	91
Figura 44: Esquematização da ocorrência da ruptura em cunha	92
Figura 45: Esquematização da ocorrência da ruptura por tombamento	92
Figura 46: Aquisição Geofísica.....	93

Figura 47: Montagem das linhas geofísicas: A) Resistivímetro; B) Linha geofísica; C) Eletrodo não polarizável e solução de sulfato de cobre	94
Figura 48: Equipamento GPR utilizado no ponto inicial de coleta de dados	95
Figura 49: Vista superior da cava e frontal da Frente SE com delimitação dos setores estudados.....	97
Figura 50: Análise Geotécnica - Estrutural. A) Demarcação em face do talude; B) Observação de feições litológicas; C) Caderneta, tabelas, lupa, martelo e pente de barton utilizados; D) Bússola Brunton	98
Figura 51: Lineamentos estruturais mapeados em escala 1:25.000 no MAPC	100
Figura 52: Estereograma das medidas estruturais da frente SE (Setores A, B e C).	100
Figura 53: Litologia e estruturas presentes no Setor A	101
Figura 54: Estereograma referente ao Setor A.....	102
Figura 55: Densidade de Fraturas na face do Setor A	102
Figura 56: Análise Cinemática Setor A – ruptura planar. O círculo vermelho representa o valor do ângulo de atrito da descontinuidade (44°); as linhas vermelhas os limiares da ocorrência de ruptura e o polígono verde representa os planos que podem deslizar sobre a superfície livre do talude.....	104
Figura 57: Análise Cinemática Setor A – ruptura em cunha. O círculo azul representa o cone de atrito das descontinuidades (valor do ângulo de atrito da descontinuidade contado a partir da borda estereograma). Os pontos pretos representam as intersecções das famílias de descontinuidades	104
Figura 58: Análise Cinemática Setor A – ruptura por tombamento. As linhas azuis representam as restrições laterais para ocorrência da ruptura (<+/-10°); os pontos pretos as intersecções de diferentes famílias de descontinuidades; o círculo azul interno representa o cone de atrito da descontinuidade (44°) e o externo representa o cone de atrito relacionado ao ângulo de inclinação do talude (70°).	105
Figura 59: Rupturas do tipo planar visíveis na face do talude	105
Figura 60: Litologia e estruturas presentes no Setor B. Blocos soltos na ruptura principal, evidências de percolação de água ao fim do plano de ruptura e resquícios de mineralização	107
Figura 61: Estereograma referente ao Setor B.....	107
Figura 62: Densidade de Fraturas na face do Setor B	108

Figura 63: Análise Cinemática Setor B – ruptura planar. O círculo vermelho representa o valor do ângulo de atrito da descontinuidade (48°); as linhas vermelhas os limiares da ocorrência de ruptura e o polígono verde representa os planos que podem deslizar sobre a superfície livre do talude.....	109
Figura 64: Análise Cinemática Setor B – ruptura em cunha. O círculo azul representa o cone de atrito (valor do ângulo de atrito da descontinuidade contado a partir da borda do estereograma). Os pontos pretos representam as intersecções das famílias de descontinuidades	109
Figura 65: Análise Cinemática Setor B – ruptura por tombamento. As linhas azuis representam as restrições laterais para ocorrência da ruptura (<+/-10°); os pontos pretos as intersecções de diferentes famílias de descontinuidades; o círculo azul interno representa o cone de atrito (48°) e o externo representa o cone de atrito relacionado ao ângulo de inclinação do talude (70°).....	110
Figura 66: Ruptura em cunha encontrada no talude inferior do Setor B	110
Figura 67: Frente SE – Setor C: demarcação de descontinuidades e litologias. Detalhe para a integridade do maciço com a conservação das marcas dos barriletes utilizados no desmonte e brecha vulcânica evidenciada na base do setor C: indícios de fluxo de água, oxidação e liberação de sulfetos com estruturas reliquias	111
Figura 68: Estereograma referente ao Setor C	112
Figura 69: Densidade de Fraturas na face do Setor C	112
Figura 70: Análise Cinemática Setor C – ruptura planar. O círculo vermelho representa o valor do ângulo de atrito da descontinuidade (56°); as linhas vermelhas os limiares da ocorrência de ruptura e o polígono verde representa os planos que podem deslizar sobre a superfície livre do talude.....	114
Figura 71: Análise Cinemática Setor C – ruptura em cunha. O círculo azul representa o cone de atrito (valor do ângulo de atrito da descontinuidade contado a partir da borda do estereograma). Os pontos pretos representam as intersecções das famílias de descontinuidades	114
Figura 72: Análise Cinemática Setor C – ruptura por tombamento. As linhas azuis representam as restrições laterais para ocorrência da ruptura (<+/-10°); os pontos pretos as intersecções de diferentes famílias de descontinuidades; o círculo azul interno representa o cone de atrito (56°) e o externo representa o cone de atrito relacionado ao ângulo de inclinação do talude (70°).....	115

Figura 73: Talude Setor C com destaque para a ruptura na parte inferior em brecha	115
Figura 74: Localização dos poços de monitoramento na cava da mina	116
Figura 75: Radargramas obtidos no Setor A	120
Figura 76: Radargramas obtidos no Setor B	121
Figura 77: Radargramas obtidos no Setor C	122
Figura 78: Resultados de resistividade elétrica para o Setor A	124
Figura 79: Resultados de cargabilidade (mV/V) obtidos no Setor A.....	125
Figura 80: Resultados de resistividade elétrica para o Setor B	127
Figura 81: Resultados de cargabilidade (mV/V) obtidos no Setor B.....	128
Figura 82: Resultados de resistividade elétrica para o Setor C	130
Figura 83: Linha 4C e diferenciação dos materiais	131
Figura 84: Resultados de cargabilidade (mV/V) obtidos no Setor C	132
Figura 85: Frente SE e diferentes pontos com rupturas.....	134
Figura 86: Correlação do radargrama 1A com modelo de resistividade elétrica e análise visual.....	135
Figura 87: Correlação do radargrama 2A com modelo de resistividade elétrica e análise visual.....	136
Figura 88: Correlação do radargrama 3A com modelo de resistividade elétrica e análise visual.....	137
Figura 89: Correlação do radargrama 1B com modelo de resistividade elétrica e análise visual.....	138
Figura 90: Correlação do radargrama 2B com modelo de resistividade elétrica e análise visual.....	139
Figura 91: Correlação do radargrama 3B com modelo de resistividade elétrica e análise visual.....	140
Figura 92: Correlação do radargrama 1C com modelo de resistividade elétrica e análise visual.....	141
Figura 93: Correlação do radargrama 2C com modelo de resistividade elétrica e análise visual.....	142
Figura 94: Correlação do radargrama 3C com modelo de resistividade elétrica e análise visual.....	143
Figura 95: Esquema representativo da interpretação dos resultados do modelo de resistividade elétrica e cargabilidade.....	144

Figura 96: Possível ponto de geração de drenagem ácida – Linhas 2 e 3A	145
Figura 97: Possível ponto de geração de drenagem ácida – Linhas 3 e 4A	146
Figura 98: Possível ponto de geração de drenagem ácida – Linhas 1 e 2B	147
Figura 99: Possível ponto de geração de drenagem ácida – Linhas 2 e 3B	148
Figura 100: Diferença dos materiais de superfície no setor C.....	149
Figura 101: Representação do fluxo de água nos diferentes setores com destaque a surgência de água e ao processo de oxidação dos sulfetos.	151
Figura 102: Esquematização de drenagem em cava de mina.....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Correlação entre poro-pressão e velocidade de deslocamento de talude.	28
Tabela 2: Principais sulfetos geradores do ácido sulfúrico sob oxidação.....	30
Tabela 3: Principais indicadores da qualidade da água em mineração.....	36
Tabela 4: Características comuns da DAM.	37
Tabela 5: Etapas do ciclo de vida de um empreendimento mineiro	41
Tabela 6: Produção mineira do CIPC entre os anos de 1977 e 1997	58
Tabela 7: Características das águas superficiais (A), rasas (B), intermediárias (C) e profundas (D).	66
Tabela 8: Características dos poços de monitoramento presentes na área da cava	67
Tabela 9: Propriedades eletromagnéticas dos principais materiais geológicos	76
Tabela 10: Valores de J_r	86
Tabela 11: Valores de J_a	87
Tabela 12: Classificação das aberturas das discontinuidades	87
Tabela 13: Classificação do fluxo de água nas discontinuidades	88
Tabela 14: Classificação da resistência de solo (S1-S6) e rocha (R6-R0) em campo	89
Tabela 15: Estimativa do ângulo de atrito de pico.....	90
Tabela 16: Características das discontinuidades mapeadas no Setor A	103
Tabela 17: Características das discontinuidades analisadas no Setor B	108
Tabela 18: Características das discontinuidades analisadas no Setor C	113
Tabela 19: Características dos poços da cava e de suas amostras analisadas	117
Tabela 20: Parâmetros químicos das amostras dos poços da cava	117
Tabela 21: Características dos poços de monitoramento da frente SE.....	150

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	HIPÓTESE	21
3	OBJETIVOS	22
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
4.1	ESTABILIDADE DE TALUDES EM CAVA DE MINA.....	23
4.1.1	Elementos Geométricos da Cadeia Mineral	24
4.1.2	Modos de Ruptura em Cavas a Céu Aberto	25
4.1.3	Influência da presença de Água	27
4.2	DRENAGEM ÁCIDA DE MINA (DAM).....	29
4.2.1	Efeitos da DAM no ambiente	32
4.2.2	Legislação	35
4.2.3	<i>Técnicas de Remediação da DAM.....</i>	37
4.3	DESCOMISSIONAMENTO DE MINA.....	39
4.3.1	Tipos de fechamento.....	42
4.3.2	Plano de Fechamento.....	45
4.3.3	Exemplos de Efetividade	47
4.3.4	<i>Descomissionamento de Minas de Urânio</i>	51
5	ÁREA DE ESTUDO.....	55
5.1	HISTÓRICO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	55
5.2	GEOLOGIA.....	59
5.2.1	Geologia Regional	59
5.2.2	Geologia da Mina Osamu Utsumi.....	61
5.3	HIDROGEOLOGIA	64
5.3.1	Hidrogeologia Regional	64
5.3.2	Hidrogeologia Local	66
5.4	GEOMORFOLOGIA	68
5.5	CLIMA E COBERTURA VEGETAL	69
6	MATERIAIS E MÉTODOS	70
6.1	MÉTODOS GEOFÍSICOS	70
6.1.1	Radar de Penetração no Solo - (GPR).....	71
6.1.2	Eletrorresistividade	78

6.1.3	Polarização Induzida	81
6.2	ANÁLISE GEOTÉCNICA – ESTRUTURAL	84
6.3	ANÁLISE CINEMÁTICA	89
7	AQUISIÇÃO DE DADOS	93
7.1	DADOS GEOFÍSICOS.....	93
7.2	DADOS GEOTÉCNICO – ESTRUTURAIS.....	96
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
8.1	RESULTADOS GEOLÓGICOS, GEOTÉCNICOS E ESTRUTURAIS	99
8.1.1	Análise Regional e Frente SE	99
8.1.2	Setor A.....	101
8.1.3	Setor B.....	106
8.1.4	Setor C.....	111
8.2	RESULTADOS HIDROQUÍMICOS.....	116
8.3	RESULTADOS GEOFÍSICOS	118
8.3.1	GPR.....	118
8.3.2	Eletrorresistividade e Polarização Induzida.....	123
8.3.2.1	Setor A.....	123
8.3.2.2	Setor B.....	126
8.3.2.3	Setor C	129
8.4	ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS.....	133
9	CONCLUSÕES	154
	REFERÊNCIAS	157

1 INTRODUÇÃO

A atividade mineira compreende uma série de processos produtivos, iniciadas na pesquisa de novas áreas para prospecção mineral, seu desenvolvimento (lavra), beneficiamento e comercialização interna ou exportação do minério. Em 2020, o setor minerário representou 2,5% do Produto Interno Bruto (PIB) com faturamento de R\$ 209 bilhões de reais e foi responsável por cerca de 17% das exportações brasileiras (MME, 2021).

A importância estratégica deste setor na geração de empregos e renda depende de estudos que proporcionem o desenvolvimento de novas tecnologias, com o objetivo de aumentar a competitividade, reduzir custos e mitigar impactos ambientais advindos da extração.

O perfil construtivo e operacional de extração dos minérios parte da escolha da melhor configuração a ser adotada: céu aberto ou subterrânea, cuja escolha depende do formato e arquitetura do depósito mineral, morfologia do terreno e processos de beneficiamento mais adequados ao contexto local. As rochas com baixo teor de minério ou estéreis encaminhadas a depósitos são comumente denominados de pilhas de estéril. Rochas com valor econômico seguem para o beneficiamento e posterior comercialização, enquanto que o rejeito de processo é geralmente encaminhado para barragens ou pilhas.

A extração de rocha mineralizada em mina a céu aberto resulta no desconfinamento do maciço rochoso, ou seja, alívio de tensões. Durante as escavações para retirada de minério nas operações de lavra a céu aberto, o maciço fica exposto as condições intempéricas e a ação de processos de hidratação e desidratação por chuvas e insolação constantes, que aceleram a redução da resistência e integridade física da rocha, com instalação de fraturamento que permite a infiltração de água para o interior da rocha (Marques *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2021).

Nestas escavações são formadas bancadas que muitas vezes atingem dezenas de metros de altura e a depender de sua inclinação, aumentam a probabilidade de ocorrência de rupturas. Outro fator importante na indução da instabilidade nos taludes é a presença de água, seja advinda do nível freático elevado ou de infiltrações superficiais, que provocam o aumento da pressão dos poros do maciço (Mandzic, 1992). A presença de água em taludes de minas a céu aberto pode

resultar na redução da resistência do material principalmente nas superfícies de descontinuidades das rochas e ocorrência de fissuras de tensão por pressão da água.

A relevância do nível da água na estabilidade de taludes em minerações também deve ser considerada sob a ótica de aceleração de processos de intemperismo em zonas mineralizadas, principalmente em depósitos de minerais reativos às condições ambientais como sulfetos e sulfatos. Nestes casos ocorre um fenômeno duplo: oxidação acelerada de sulfetos com consequente destruição acelerada da integridade física da rocha, com dissolução do enxofre nas águas e conversão em ácido sulfúrico, que origina um efluente denominado Drenagem Ácida de Mina (DAM), com pH ácido e elevada carga de metais dissolvidos (Skousen *et al.*, 2019, Moreira *et al.*, 2020). Este fenômeno pode implicar na dissolução da cimentação de poros e fraturas, além de contaminar o aquífero e as águas de fundo de cava em situações de surgência nos taludes.

Os piezômetros são os recursos de monitoramento mais utilizados para avaliar as pressões da água subterrânea pelas operações mineiras. O mapeamento geológico para posicionar o piezômetro fornece um resultado abrangente da direção da percolação das poros-pressões decorrentes do fluxo de água. A determinação dos pontos de instalação de piezômetros deve ser a mais precisa possível devido ao custo de implantação e à inconstância das pressões atuantes nas águas subterrâneas (Hvorslev, 1951). Uma alternativa racional para local piezômetros é entender os padrões de faturamento de um maciço e, conseqüentemente os fluxos de água subterrânea, além de realizar estudos geofísicos prévios para reconhecer o nível freático (Kelly e Mares 1993; Socco *et al.*, 2010; Camarero e Moreira 2017).

O entendimento dos padrões de fraturamento em um maciço é de fundamental importância para assegurar sua estabilidade (Hudson e Priest, 1983). Os principais problemas geológicos e geotécnicos de um maciço são caracterizados pelos padrões geométricos das descontinuidades que envolvem sua orientação, alteração, abertura, persistência, preenchimento, rugosidade, espaçamento e presença de água. Os procedimentos usuais para a avaliação da estabilidade de um talude consistem nas inspeções visuais da face do talude, onde é possível obter dados sobre litologia, mapeamento das descontinuidades existentes e sua orientação (direção e mergulho da estrutura). Além destas são frequentemente utilizados o Sistema Q para análise da alteração e rugosidade das paredes das descontinuidades e os métodos propostos pela ISRM para verificação de surgência de água na face do talude (ISRM, 1978;

Barton, 2006). Com estes resultados são feitas análises cinemáticas que permitem a verificação da probabilidade de ocorrência de determinados tipos de rupturas.

Os métodos geofísicos são utilizados para determinar a estrutura interna de um solo ou maciço rochoso a partir da correlação de propriedades físicas com os resultados obtidos (Hack, 2000). O método geofísico da eletrorresistividade é utilizado para identificar zonas saturadas e distinguir diferentes litologias no interior do maciço com base nas diferenças das propriedades elétricas dos materiais (Hack, 2000; Adams e Younger, 2001; Friedel *et al.*, 2006; Rapantova *et al.*, 2007, Hamdan *et al.*, 2014; Abdelghani *et al.*, 2015; Namaghi *et al.*, 2015, Targa *et al.*, 2019).

O GPR - Ground Penetrating Radar ou Radar de Penetração no Solo, por sua vez, utiliza o princípio da transmissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência e fornece resposta diante da existência de estruturas e feições geológicas subsuperficiais rasas (Davis e Annan 1989; Goodman *et al.*, 1995). Este método é aplicado em estudos hidrogeológicos e geotécnicos para mapeamento de fraturas e falhas (Stevens *et al.* 1995; Grodner, 2001; Rashed *et al.* 2003; Willenberg *et al.* 2004; Theune *et al.* 2006; Porsani *et al.* 2012; Silva *et al.*, 2022), cavernas (Chamberlain *et al.* 2000; Elizondo *et al.* 2012; Čeru *et al.* 2018; Ebong *et al.* 2021; Janocha *et al.* 2021; Osinowo e Elebute, 2023) e pesquisa mineral (Sigurdsson 1994; Porsani *et al.* 2004).

O método da polarização induzida (IP) é baseado no fenômeno da polarização elétrica em subsuperfície e é amplamente realizado na exploração de recursos minerais e estudo de águas subterrâneas. O processo é realizado a partir da estimulação de tensão que ocorre após o atraso ou retardo na transmissão de corrente elétrica artificial em solos e rochas (Telford *et al.*, 1990). A quantificação da polarizabilidade é realizada com base nas variações de tensão e o parâmetro físico medido é a cargabilidade. A correlação entre os métodos da eletrorresistividade e da polarização induzida (IP) permite a identificação de áreas prováveis de geração de drenagem ácida, diante da sua assinatura geoeletrica (Greer *et al.* 2017; Hester *et al.* 2019). Essas zonas apresentam baixa resistividade e alta cargabilidade, devido a elevada concentração de íons dissolvidos no fluido intersticial (Nascimento *et al.*, 2022).

A Mina Osamu Utsumi está localizada no município de Caldas, Minas Gerais, em região que concentra altos índices de pluviosidade, próximos a 1700 mm/ano. A mina está em fase de descomissionamento desde o encerramento de sua produção em 1995 e os motivos para a sua não concretização é a existência de drenagem ácida

proveniente das pilhas de estéril (Targa *et al.*, 2019; Moreira *et al.*, 2020), além de visíveis problemas de estabilidade geotécnica na cava, o que compromete a segurança das operações (Gastmaier Marques *et al.*, 2022). Para a legislação brasileira, o descomissionamento de um empreendimento mineiro é efetivo quando são asseguradas a estabilidade química e geotécnica do local, com o objetivo de reintegrar a área ao ambiente com segurança (ANM, 2021).

2 HIPÓTESE

As análises de estabilidade em maciços de solo e de rocha geralmente consideram apenas os parâmetros estáticos como mineralogia, espessura, condicionantes estruturais, litologia e morfologia de terreno. No entanto, grande parte das rupturas ocorrem sob condições da ação do intemperismo incipiente e de saturação, ou seja, na presença de água. O fluxo hidrogeológico no interior de sistemas porosos (solo) e fraturados (rocha) é dinâmico e sofre alterações ao longo do ano.

Diante do exposto, algumas questões podem ser definidas: qual a relevância de parâmetros dinâmicos na estabilidade de taludes? A dinâmica do fluxo subterrâneo e a eventual existência de zonas preferenciais de fluxo podem comprometer a estabilidade de taludes em longo prazo?

Neste sentido, o presente trabalho propõe a integração de métodos geotécnicos tradicionais com levantamento de dados dos parâmetros estáticos do talude (litologia, zonas intemperizadas, levantamento estrutural e fluxos de água aflorantes) aliados a métodos geofísicos (Eletrorresistividade, Polarização Induzida e GPR), com vistas a avaliar o fluxo hidrogeológico em sistema de fraturas do maciço rochoso de mina a céu aberto e análise do fenômeno de geração de drenagem ácida de mina, e suas consequências na estabilidade geotécnica de taludes rochosos.

3 OBJETIVOS

Analisar a estabilidade de taludes em mina a céu aberto em fase de descomissionamento, por meio da integração de parâmetros geotécnicos (litologia e estrutural) estáticos de superfície e parâmetros dinâmicos de subsuperfície (fluxo hidrogeológico) por investigação geofísica.

Os principais objetivos específicos do trabalho são:

- Avaliar o potencial uso da geofísica no reconhecimento de discontinuidades que apresentem fluxo hidrogeológico no interior do maciço;
- Identificar os locais de fluxo hidrogeológico e correlacionar com prováveis pontos de rupturas pela classificação geotécnica e com a geração de drenagem ácida;
- Analisar como esses prováveis pontos podem comprometer a estabilidade a longo prazo.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 ESTABILIDADE DE TALUDES EM CAVA DE MINA

Uma das características presentes na atividade mineira é a rigidez locacional diante da natureza de formação dos depósitos minerais, ou seja, a escolha do empreendedor está condicionada a existência prévia de depósitos minerais. Desta forma, as minas a céu aberto ou subterrâneas estão suscetíveis a localizações cujos aspectos geotécnicos nem sempre são favoráveis (Karam *et al*, 2015).

As escavações para retirada de minério ocorrem geralmente por meio de bancadas em minerações a céu aberto, que muitas vezes atingem dezenas de metros de altura. O custo de escavação, descarte e a relação estéril/minério encontrada em cada bancada são fatores importantes e decisivos no planejamento da lavra (Macêdo *et al*, 2001). A redução do volume a ser escavado é uma forma adequada de diminuir custos e otimizar as operações, embora implique na maior inclinação de taludes. Desta forma, a probabilidade de ocorrência de rupturas é proporcional ao aumento da inclinação de taludes.

A estabilidade de taludes em minas a céu aberto tanto a curto como a longo prazo desempenha importante papel no projeto do planejamento da mina, embora complexa devido a variedade de fatores que interferem na segurança das operações mineiras (Cala *et al*, 2020).

Os taludes de mineração possuem vida útil curta em relação a obras civis e são preenchidos parcialmente ou totalmente por estéréis, rejeitos ou água após o fechamento da mina, fatores estes que impõem novas condições de estabilidade geotécnica (Costa, 2009).

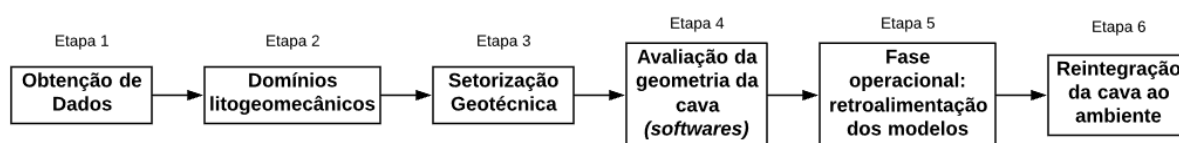
O nível de segurança de um talude estabelece relação com seu tempo de estabilidade. Segundo a NBR 11682 – Estabilidade de taludes, o fator de segurança (FS) é a relação entre os esforços estabilizantes (resistentes) e os esforços atuantes que promovem a instabilidade do material (ABNT, 2009). O talude é considerado estável quando os esforços estabilizantes forem maiores que os instabilizantes. Os taludes de curto prazo na operação mineira são constantemente modificados e projetados com fatores de segurança intermediário, ou seja, entre 1,07 e 1,3. Ao

encerrar a vida útil do empreendimento mineiro, os taludes devem adquirir fator de segurança maior que 1,5 de modo a garantir estabilidade a longo prazo e sem indícios de rupturas. Fatores de segurança com valores abaixo de 1,07 são considerados instáveis, ou seja, na iminência de ruptura (Maria, 2016; Zakaria *et al*, 2018).

4.1.1 Elementos Geométricos da Cadeia Mineral

Existem 6 etapas a serem cumpridas para determinação da geometria de uma cava de mina a céu aberto (Figura 1).

Figura 1: Etapas para determinação da geometria da cava



Fonte: Adaptado de Read e Stacey (2009)

A primeira etapa consiste na obtenção de dados estruturais, hidrológicos e litológicos, que possibilitam a elaboração dos modelos hidrogeológicos e geotécnicos da cava, base para a etapa seguinte. A segunda etapa consiste em definir domínios litogeomecânicos, obtidos a partir dos mapas pré-elaborados juntamente com informações laboratoriais, como por exemplo resistência das rochas. A integração destes resultados permite avançar para a terceira etapa, de setorização da cava segundo elementos litológicos, mineralizações e suscetibilidade a rupturas.

Na quarta etapa são definidas características geométricas dos taludes como por exemplo altura global e de talude, ângulo geral e de face, largura de berma. Essas variáveis são ainda analisadas em função dos equipamentos de escavação disponíveis no empreendimento.

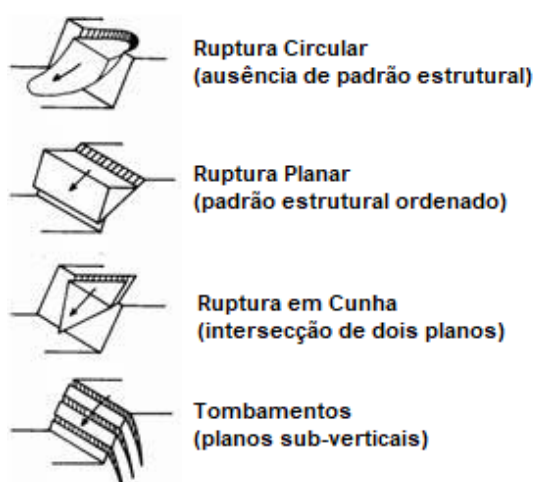
A etapa 5 consiste no uso de *softwares* para analisar e avaliar as condições de estabilidade da geometria proposta, condicionada às definições geométricas na etapa anterior. O projeto é colocado em prática em caso positivo. O modelo inicialmente

adotado é retroalimentado à medida que a cava avança, com vistas a atender as condições de estabilidade pré-estabelecidas. A sexta etapa consiste no encerramento e descomissionamento das operações mineiras e caso a condição de estabilidade da cava esteja assegurada, existe a possibilidade de início dos trabalhos de reinserção ao ambiente.

4.1.2 Modos de Ruptura em Cavas a Céu Aberto

O maciço rochoso a ser explorado e escavado em uma mina a céu aberto apresenta ao longo da sua história de formação tensões originais advindas principalmente do tectonismo. A escavação proporciona o alívio ou concentração de tensões em pontos localizados, reconhecidas pelo surgimento de rupturas nos taludes (Goodman, 1989). Existem quatro modos de rupturas: circular, planar, em cunha e tombamento (Figura 2).

Figura 2: Modos de ruptura mais frequentes em taludes



Fonte: adaptado de Hoek e Bray (1981)

A ruptura circular é caracterizada pela ausência de padrões estruturais ou planos de fraquezas e, apesar de ocorrer predominantemente em solos, também existem registros em taludes rochosos altamente fraturados. Neste caso, os blocos de

rocha são pequenos quando comparados a altura total do talude e não há predominância na orientação das descontinuidades (Sjoberg e Norstrom, 2000).

Uma descrição de ocorrência de ruptura circular de talude na mina Bingham Canyon, localizada em Utah nos Estados Unidos, é apresentada em Caldwell (2013) (Figura 3). Neste evento ocorreram somente perdas materiais, pois foi possível evacuar o empreendimento devido a detecção prévia de anomalias de deslocamento no talude através do sistema de radar utilizado para monitorar a cava (Menezes, Carneiro e Meireles, 2019).

As rupturas do tipo planar, cunha e tombamento são caracterizadas por condicionantes estruturais prévios, ou seja, podem ser analisadas através de medidas de orientação de fraturas e permitem reconhecer o padrão predominante de descontinuidades com relação a geometria do talude. Alguns condicionantes são necessários para a ocorrência de rupturas planares:

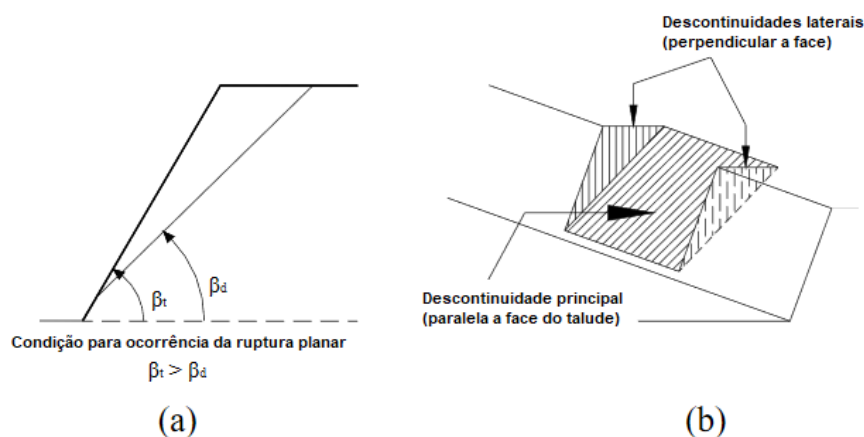
- A direção do plano de ruptura deve ser praticamente paralela a direção da face do talude com variação máxima de 20° ;
- A descontinuidade deve interceptar a face do talude num ângulo de mergulho menor que a face do talude (Figura 4a);
- Descontinuidades laterais perpendiculares a face do talude, como por exemplo trincas de tração, devem existir de modo que seja formado um bloco distinto junto a descontinuidade principal (Figura 4b).

Figura 3: Exemplo de ruptura circular ocorrida em Utah/USA



Fonte: extraído de Caldwell (2013)

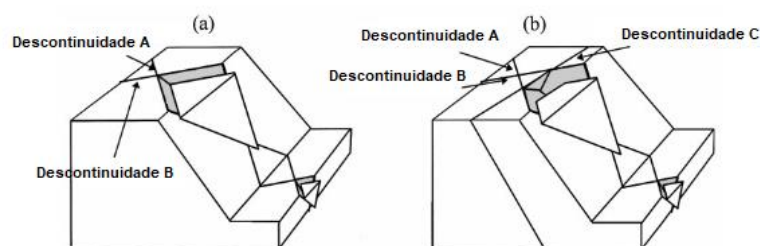
Figura 4: Condições para ocorrência de rupturas planares



Fonte: Modificado de Maia (2003)

O tipo cunha é caracterizado pela ocorrência de rupturas ao longo de duas ou mais descontinuidades com cisalhamento (Fleurisson, 2012). É frequentemente observada em rochas competentes e apresenta variabilidade cinemática que depende da quantidade de intersecções geométricas no conjunto de descontinuidades (Figura 5) (Kumsar *et al*, 2000).

Figura 5: Ruptura em cunha em: (a) duas famílias de descontinuidades e (b) três famílias de descontinuidades



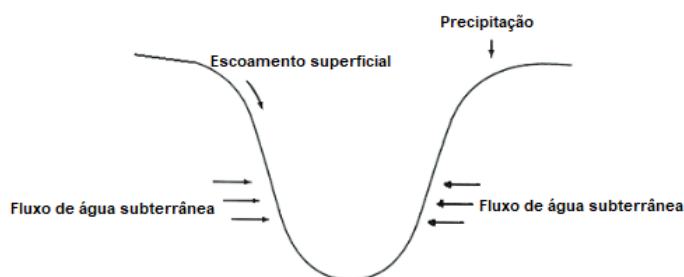
Fonte: adaptado de Kumsar *et al*, (2000)

4.1.3 Influência da presença de Água

Um dos fatores mais importantes na indução da instabilidade nos taludes de minas a céu aberto é a presença de água, seja advinda do nível freático elevado ou

de infiltrações superficiais (Figura 6), que provocam o aumento da pressão dos poros do maciço acima da superfície da ruptura (Mandzic, 1992). A estimativa da pressão dos poros num maciço rochoso depende de medidas prévias de profundidade e continuidade lateral no nível freático.

Figura 6: Componentes do fluxo de água em minas a céu aberto



Fonte: Modificado de Aryafar *et al*, 2007

A presença de água em taludes de minas a céu aberto pode resultar na redução da resistência do material principalmente nas superfícies de descontinuidades e ocorrência de fissuras de tensão por pressão da água.

Estudos realizados em um período de 6 anos na mina de ferro de Smreka - Iugoslávia, indicaram a forte influência da poro-pressão de água na velocidade de deslocamento dos taludes em superfície (Mandzic, 1992). A velocidade de deslocamento (cm/dia) aumentava proporcionalmente ao aumento da poro-pressão (Tabela 1).

Tabela 1: Correlação entre poro-pressão e velocidade de deslocamento de talude.

Poro-pressão	Velocidade de deslocamento do talude (cm/dia)
0	0
0,1	1
0,2	2
0,3	4
0,4	6
0,5	10
0,6	>10

Fonte: Adaptado de MANDZIC (1992)

A infiltração de água é considerada elemento chave na análise da estabilidade geotécnica nos taludes de mina a céu aberto. A força ocasionada pela infiltração de água exerce influência tanto na condição de estabilidade quanto no custo operacional

da mina, juntamente com a poro-pressão (Ardejani *et al*, 2003). O fluxo desta água é controlado pela geometria do maciço, descontinuidades e propriedades como condutividade hidráulica e permeabilidade. No entanto, todos esses fatores possuem muitas incertezas diante da heterogeneidade e anisotropia dos maciços de solo ou rocha.

O efeito da infiltração de água na estabilidade do talude pode ser derivado de 3 fatores (Moosavi *et al*, 2016):

- Pressão hidrostática: pressão lateral nas paredes de descontinuidade exercida através da movimentação dos blocos rochosos, que reduz a resistência do maciço e induz a processos de rupturas;
- Efeitos físico-químicos da água infiltrante: estimulam a diminuição do atrito de cisalhamento entre preenchimento e rocha em descontinuidades e induz desprendimento de blocos;
- Intervenção inadequada no talude: proporciona o alívio de tensões e induz a ocorrência da formação de trincas ou fissuras na parte superior do talude.

Os piezômetros são os recursos mais utilizados para leitura das pressões de água em subsuperfície. O mapeamento geológico para locação de malhas de piezômetros proporciona um resultado abrangente do sentido de percolação de poro-pressões advindas do fluxo de água. A determinação de pontos de instalação de instrumentos piezométricos deve ser o mais precisa possível devido ao custo de implementação e inconstância das pressões atuantes na água subterrânea (Hvorslev, 1951). Uma alternativa racional para locação de piezômetros é a realização de estudos geofísicos prévios para reconhecimento do nível freático (Kelly e Mares, 1993; Moura e Malagutti Filho, 2003; Boiero *et al*, 2010; Camarero e Moreira, 2017), embora raramente empregada em empreendimentos mineiros.

4.2 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA (DAM)

Um dos principais problemas ambientais associados a mineração de carvão e de sulfetos metálicos é a Drenagem Ácida de Mina (DAM), resultante da oxidação

natural de minerais portadores de enxofre expostos a água e ao oxigênio (Menezes *et al*, 2004).

Os metais pesados como chumbo, mercúrio, cobre, urânio e cádmio são suscetíveis à lixiviação natural quando o rejeito do processo de beneficiamento e estéréis da mineração são depositados e expostos à ação natural do intemperismo. O efluente gerado apresenta pH ácido e pode ocasionar contaminação de cursos d'água adjacentes e águas subterrâneas quando em condições não controladas (Campaner e Silva, 2009).

A geração e fluxo de drenagem ácida é uma questão preocupante em empreendimentos mineiros diante do grande impacto ambiental em potencial. Existe uma classe de minérios portadores de minerais economicamente valiosos que quando expostos ao intemperismo mantêm sua estabilidade como nas condições geológicas originais. Contudo, sulfetos são minerais muito reativos quando escavados e expostos às condições atmosféricas e reagem rapidamente seja por oxidação direta ou por ataque de micro-organismos (Tabela 2).

A interação entre drenagem ácida de mina e demais minerais presentes na rocha ou na assembleia mineral do depósito pode resultar no incremento de elementos dissolvidos nesta solução e na mobilidade de metais, fatores que aumentam o potencial de contaminação e toxicidade (Younger, Banwart e Hedin 2002).

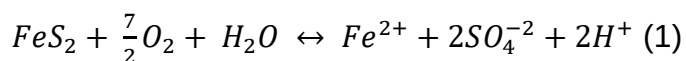
Tabela 2: Principais sulfetos geradores do ácido sulfúrico sob oxidação.

Sulfeto	Fórmula
Pirita	FeS_2
Pirrotita	Fe_xS_x
Calcosita	Cu_2S
Covelita	CuS
Calcopirita	CuFeS_2
Arsenopirita	FeAsS_2
Molibdemitita	MoS_2
Galena	PbS
Millerita	NiS
Esfalerita	ZnS

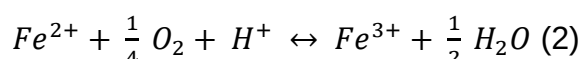
Fonte: adaptado de Farfán *et al*, (2004)

A pirita é um dos sulfetos mais comuns existentes em depósitos minerais um dos principais minerais formadores da drenagem ácida (Akcil e Koldas, 2006). O processo de destruição de pirita pode ser sintetizado em 4 etapas principais, iniciado

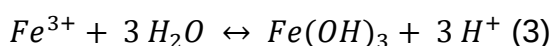
pela oxidação do mineral sulfetado em íon metálico dissolvido, sulfato e íon hidrogênio:



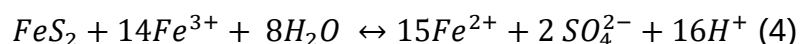
Os íons Fe^{2+} , SO_4^{2-} e H^+ resultam em um aumento no total de sólidos dissolvidos e da acidez da água. Sob condições ambientais suficientemente oxidantes e com altas concentrações de O_2 , pH e atividade bacteriana adequadas, a maioria dos íons ferrosos serão oxidados para a forma de íon férrico:



O íon férrico (Fe^{3+}) é precipitado como $Fe(OH)_3$ e jarosita ($K_2Fe_6(OH)_{12}(SO_4)_4$) quando o pH de determinado ambiente varia entre 2,3 e 3,5. A jarosita precipita apenas em condições extremas de $pH < 2,5$ em ambientes com soluções cuja concentração de SO_4^{2-} seja maior que 3.000 mg/L. A alta concentração desse íon indica que os sedimentos das drenagens foram acometidos pela drenagem ácida (Equeenuddin *et al*, 2013):

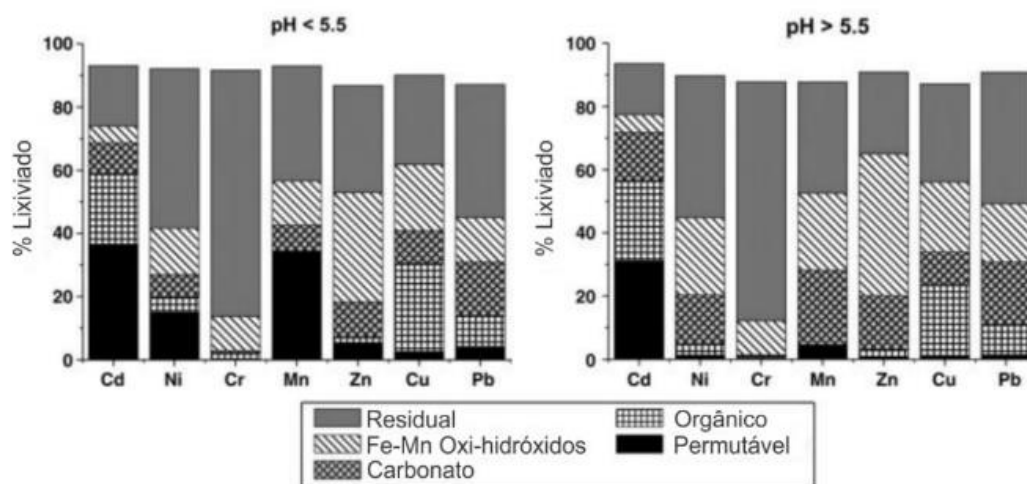


O íon Fe^{3+} que ainda permanece em solução potencializa a ação oxidante do íon férrico e estimula a oxidação adicional de pirita em condições ácidas:



O ambiente ácido favorece a relação entre remoção de determinados elementos e o pH de hidrólise de cada espécie química, cujos quais apresentam um valor específico de pH que determina a solubilidade do elemento (Campaner e Silva, 2009). O pH apresenta influência direta na partição de metais e na fração em que eles são retidos (Equeenuddin *et al*, 2013). A maioria dos metais está disponível na forma solúvel e com alta mobilidade química quando pH é inferior a 5,5 em sedimentos afetados pelas drenagens ácidas, como elementos cádmio (Cd), níquel (Ni), chumbo (Pb), cobre (Cu) e manganês (Mn) (Figura 7).

Figura 7: Porcentagem de elementos presentes em áreas com drenagem ácida (pH < 5,5) e drenagens naturais (pH > 5,5)



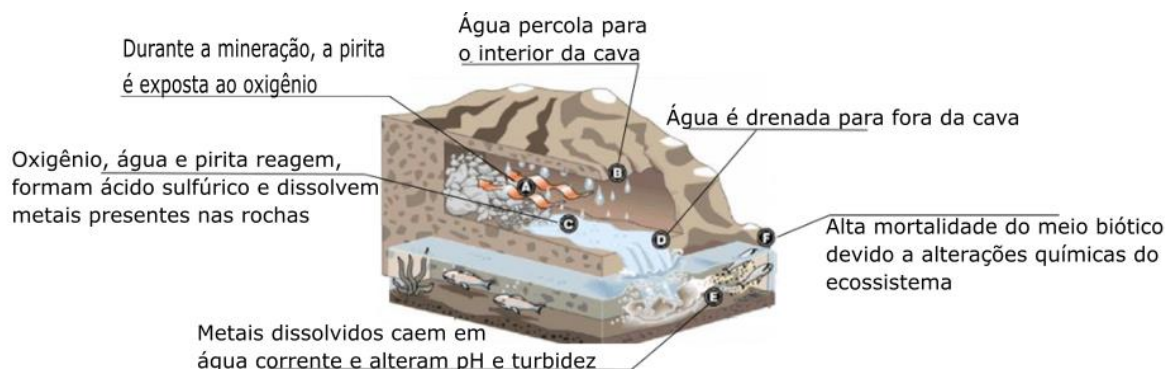
Fonte: Equeenudding *et al*, (2013)

4.2.1 Efeitos da DAM no ambiente

A drenagem ácida causa diversos efeitos ao ambiente como poluição das águas subterrâneas e de superfície, além de danos à flora e fauna (Figura 8) (Singh e Kalamdhad, 2011). Além disso, ocorre a deterioração e empobrecimento do solo diante da ausência de nutrientes como cálcio e magnésio e altas concentrações de alumínio, manganês e ferro, fatores que diminuem a produção de matéria orgânica, aeração do solo e fertilidade (Halcomb e Fare, 2002; Simate e Ndlovu, 2014).

A origem da drenagem ácida proveniente de cavas de minas a céu aberto, galerias subterrâneas, pilhas de estéréis ou bacias de rejeitos, são em última análise produto do intemperismo natural, com eventual aceleração em projetos negligentes às questões de impacto ambiental em médio e longo prazo.

Figura 8: Esquematisação do processo de formação da DAM em minerações.



Fonte: adaptado de Western Pennsylvania Conservancy (2006)

Medidas mitigadoras e de reparação são bastante dispendiosas para as indústrias de mineração e muitas vezes alcançam valores próximos a milhões de dólares anuais neste tipo de cenário (Souza, 2015).

Diversos exemplos de danos ambientais provocados pela geração da DAM são encontrados na literatura, como por exemplo em minas de metal abandonadas localizadas no Cinturão Ibérico de Pirita - IPB (*Iberian Pyrite Belt*) - província de Huelva, Sudoeste da Espanha, segundo estudo realizado por Sánchez *et al.*, (2013). Esta localidade representa um dos maiores acúmulos de resíduos de minas geradoras de DAM do mundo, com 57 pilhas de estéreis, 10 barragens de rejeito e 22 poços inundados, com total aproximado de 25 milhões de m³ de água ácida. O principal problema da drenagem ácida no IPB é a quantidade de minas existentes em sua extensão e a liberação dessas águas para os rios Tinto e Odiel e seu consequente impacto ambiental. Neste caso, sistemas de remediação tradicionais são ineficientes, uma vez que em casos extremos o pH das águas destas minas abandonadas atinge 0,82 e novas formas de tratamento devem ser estudadas mesmo após o processo de descomissionamento (Sánchez, 2013; Ayora *et al*, 2013).

A ruptura de uma barragem de rejeitos de uma mina de zinco em 1998 provocou o maior acidente ambiental da história do país, com 2 milhões de metros cúbicos de lama ácida liberados para o estuário Doñana (Espanha), localizado no oceano Atlântico. A região pantanosa atingida pela lama tem importância internacional, visto ser uma área de conservação ambiental com a mortalidade de toneladas de peixes e mariscos, cujas medidas de emergência adotadas estimadas em 200 milhões de euros (Tovar-Sanchez *et al*, 2006).

Há ainda diversos estudos em desenvolvimento no Japão, onde das mais de 5000 minas abandonadas ou fechadas, aproximadamente 100 empreendimentos geram drenagem ácida (Tokoro *et al*, 2020). Apesar da DAM não ter gerado graves danos ao ambiente nas últimas décadas no país, é estimado que algumas minas necessitem do tratamento por mais 150 anos, com investimentos de bilhões todos os anos de modo a garantir sua eficácia para que desastres ambientais sejam evitados (Koide *et al*, 2012).

Estudos semelhantes foram feitos em uma mina de cobre geradora da DAM, em Mianmar. O monitoramento intensivo da química de corpos de água circundantes à mina é de suma importância para que não haja contaminação dos rios Yama e Chindwin, responsáveis pela agricultura – fonte de renda essencial da região (Aung e Tin, 2020). Ocorreu em 1996 o transbordamento de 1,5 milhões de metros cúbicos de DAM advindos de uma lagoa de rejeitos de uma mina de cobre localizada em Marinduque, nas Filipinas. Este evento foi alvo de várias pesquisas sobre os impactos advindos da drenagem ácida no ambiente. Os corais existentes na costa próximo ao desemboque do rio Boac registraram altos níveis de metais pesados persistentes até os dias de hoje (David, 2003).

Os efeitos da drenagem ácida da mina no ambiente podem ser resumidos em fatores químicos, físicos, biológicos e ecológicos (Figura 9).

Figura 9: Principais efeitos da DAM



Fonte: Gray (1997)

4.2.2 Legislação

A inexistência de legislações específicas induziu a disposição inadequada de rejeitos e estéreis sem preocupação ambiental durante muitas décadas. Atualmente existe a necessidade de comprovação da intensidade e magnitude dos danos ambientais ocasionados pelos estéreis ou rejeitos previamente a instalação ou expansão de um empreendimento mineiro, frente ao enrijecimento das leis ambientais como resposta as negligências do passado (Borma e Soares, 2002; Souza, 2015). O projeto de recuperação de áreas degradadas exige o monitoramento contínuo das águas superficiais e efluentes mesmo após o encerramento das atividades para garantia de controle das concentrações dos contaminantes dentro de limites previstos em legislação. Este projeto é analisado pelos órgãos ambientais competentes a cada Estado e também pela ANM (Agência Nacional de Mineração).

Os objetivos desses projetos são (CETEM, 2001):

- Caracterizar o balanço hídrico e o regime de vazão dos principais corpos hídricos receptores e seus efluentes na área de abrangência da mineração;
- Análise descritiva da qualidade das águas fluviais na área de estudo: investigar a influência do comportamento hidrológico na distribuição espacial e temporal da concentração total de metais pesados e comparar as concentrações observadas com os índices e critérios estabelecidos pela legislação brasileira (CONAMA);
- Avaliar o risco potencial à saúde humana.

A resolução CONAMA nº 20/86 “Classificação de águas segundo seus usos preponderantes e as normas para o lançamento de efluentes líquidos” rege no Brasil uma classificação das águas em: doces, salobras, salinas e suas sub-classes, essenciais para a defesa da qualidade das águas e são avaliadas por parâmetros e indicadores específicos (Farfán *et al*, 2004). Os principais aspectos ambientais ocasionados pelos empreendimentos mineiros são relativos a alteração da paisagem, rebaixamento do nível freático e erosão. Seus respectivos indicadores e impactos são descritos na Tabela 4.

A DAM apresenta características típicas com relação a concentrações e impactos causados, independente do seu lugar de ocorrência (Tabela 5). Os

indicadores mais importantes a serem monitorados na DAM são: turbidez, pH e sulfetos quando comparados aos padrões exigidos pela CONAMA podem fazer com que a água retorne ao ambiente sem potenciais danos (Farfán *et al*, 2004).

O Departamento de Interior dos Estados Unidos – Escritório de Controle de Mineração de Superfície (OSM) emitiu em 1997 uma orientação política para programas estaduais com relação a correção, prevenção e controle da drenagem ácida de mina, conhecida como Política AMD, que proíbe licença cujas análises hidrológicas indiquem descarga de poluição que exija tratamento contínuo de longo prazo indefinido (Skousen *et al*, 2019). Esta política induziu o crescimento de estudos para desenvolvimento de técnicas de prevenção e controle das DAMs. Além deste, a Lei da Água Limpa – Clean Water Act – afirma que a permissão para descarga de água de minerações requer o monitoramento constante de pH, sólidos suspensos totais e valores de concentração de Ferro (Fe) e Manganês (Mn).

Tabela 3: Principais indicadores da qualidade da água em mineração

Aspectos	Impactos	INDICADORES
Drenagem Ácida	. Acidificação de águas superficiais . Redução de produtividade biológica nos rios . Aumento da concentração de metais nas águas dos rios . Contaminação de águas subterrâneas	. pH, Eh, condutividade elétrica . Oxigênio dissolvido . Concentração de metais pesados . Sólidos em suspensão . Concentração de sulfato . Extensão de rio impactado . Número de poços com qualidade d'água inadequada para consumo humano . Áreas agricultáveis perdidas . Balanços de massas de materiais nas bacias hidrográficas
Rebaixamento do Lençol Freático	. Redução de disponibilidade de recursos hídricos	. Número de poços secos . Mudança de nível do lençol d'água . Análises químicas da água (estabilidade física dos taludes)
Erosão	. Instabilidade física das margens dos rios . Aumento da carga de sólidos em suspensão nas águas superficiais	. Sólidos em suspensão . Fator de segurança (estabilidade física dos taludes) . Extensão do rio assoreado

Fonte: CETEM, 2001

Tabela 4: Características comuns da DAM.

<i>Propriedades</i>	<i>Espécies Químicas Típicas Associadas</i>	<i>Faixa de Concentração</i>	<i>IMPACTO</i>
<i>Acidez</i>	<i>Ácido Sulfúrico</i>	<i>2,0 - 4,0 (pH)</i>	<i>Mobilização de íons metálicos</i>
<i>Ferro</i>	<i>Íons Ferroso e férico, Óxido férico, Hidróxidos</i>	<i>100-3000 (mg/L)</i>	<i>Descoloração e turbidez nas águas, Incremento do pH, precipitação do Fe III</i>
<i>Metais Pesados</i>	<i>Cu, Mg, Zn, Cd, Hg, Pb, As.</i>	<i>1-200 (mg/L)</i>	<i>Redução da flora e fauna aquática, bio-acumulação e redução da qualidade e abastecimento da água Potável</i>
<i>Sólidos Totais</i>	<i>Ca, Mn, Al, SO₄</i>	<i>100-30 000 (mg/L)</i>	<i>Redução da qualidade da água no abastecimento</i>

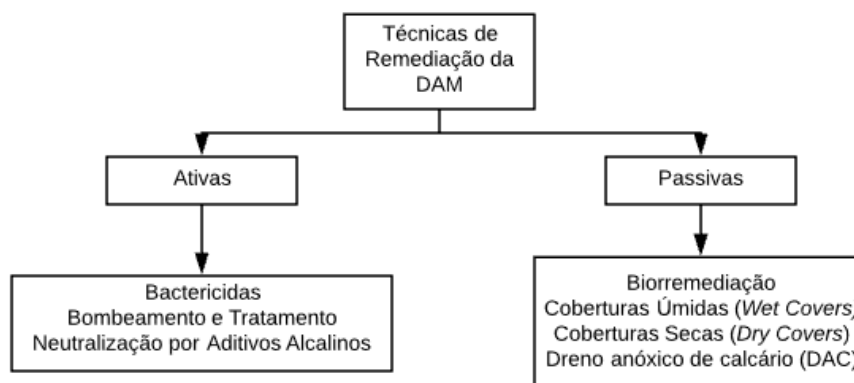
Fonte: CETEM, 2001

4.2.3 Técnicas de Remediação da DAM

Diversas técnicas de remediação foram desenvolvidas na tentativa de controlar as consequências ambientais negativas oriundas da drenagem ácida seja em sua fonte ou no processo migratório (Johnson e Hallberg, 2005; Skousen *et al*, 2019). Para instituir o controle da fonte geradora é realizada a remoção do oxigênio ou da água antes do contato com as zonas sulfetadas, ou realizada a separação dos minerais sulfetados das pilhas de estéril. No entanto, o controle do processo de migração é preferível na maioria das vezes devido ao alto grau de complexidade e custo do controle da fonte geradora da drenagem ácida (Simate e Ndlovu, 2014).

As técnicas de remediação da drenagem ácida são subdivididas em tratamentos ativos e passivos, de acordo com a necessidade de introdução de energia no sistema para o tratamento (Figura 10) (Johnson e Hallberg, 2005; Barros *et al*, 2012). A remediação pode ser abiótica ou biótica, também denominada bioremediação e descreve a capacidade de alguns microrganismos em gerar alcalinidade através da neutralização do pH (Moraes, 2010).

Figura 10: Técnicas de Remediação da Drenagem Ácida de Mina



Fonte: elaborado pelo autor

O uso de bactericidas como técnica de remediação ativa inibe a ação bacteriológica. As bactérias são eliminadas por meio da aplicação direta de surfactantes aniônicos e com isso a geração ácida diminui de 60% a 95%. No entanto, a aplicação desses bactericidas é limitada devido a elevada solubilidade e mobilidade na água e consequente geração de problemas ambientais derivados (Johnson e Halberg, 2005; Moraes, 2010).

A técnica de bombeamento e tratamento é muito utilizada em minerações, onde o efluente de baixo pH é bombeado até uma estação de tratamento e tratado para que posteriormente possa ser devolvido ao ambiente (Murta, 2006). No entanto, os gastos com energia para o bombeamento e com os compostos químicos para o tratamento podem tornar essa alternativa inviável a longo prazo.

Processos de neutralização por aditivos alcalinos visam obter um efluente para reuso e descarte nos rios com características aceitáveis perante a legislação. Essa neutralização pode ser feita através da mistura de aditivos alcalinos com o material potencialmente produtor de ácido; incorporação dos aditivos em camadas junto com o estéril; aplicação do aditivo como valas para geração de um canal condutor das águas ou na superfície para aumentar o crescimento de plantas. Os aditivos alcalinos mais utilizados para neutralização da DAM são o carbonato de cálcio (CaCO_3), hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), óxido de cálcio (CaO), hidróxido de sódio (NaOH) e amônia (NH_3) (Skousen *et al*, 2019).

No que tange as técnicas de remediação passivas, a biorremediação é realizada através do controle dos metais presentes no efluente por plantas, microorganismos e substratos orgânicos. Os metais são acumulados nas plantas a

partir da adsorção, porém a remoção destes é pequena com relação ao total existente no efluente (Trindade e Soares, 2004).

O uso de coberturas úmidas é considerado um dos métodos mais seguros no controle da DAM e seu mecanismo de ação ocorre através do bloqueio da entrada de oxigênio no sistema para estabelecer condições redutoras. Sua escolha é justificada em locais onde o nível freático pode ser elevado para que os locais de geração de acidez permaneçam submersos (Borma e Soares, 2002; Fagundes, 2005).

Paralelo a técnica anterior existe o uso de coberturas secas colocadas sobre o depósito do material reativo, com objetivo de controle da entrada de oxigênio e água e a inibição da oxidação dos sulfetos. Essas coberturas são compostas de uma camada de material argiloso compactado e abaixo dele uma camada de material permeável geralmente arenoso, que forma uma barreira capilar auxiliadora na retenção de água no interior da camada argilosa. A manutenção do grau de saturação da camada argilosa garante a eficiência desse sistema como barreira à difusão do oxigênio (Galatto *et al*, 2007).

O Dreno Anóxico de Calcário (DAC) consiste em um leito de calcário soterrado de modo a interceptar o fluxo subterrâneo e o contato com o oxigênio atmosférico para impedir a oxidação dos metais. No entanto, a vida útil deste sistema pode ser reduzida em altas concentrações do íon férrico, oxigênio dissolvido e alumínio (Trindade e Soares, 2004).

4.3 DESCOMISSIONAMENTO DE MINA

O conceito de descomissionamento de mina é amplamente discutido na literatura (Smith e Underwood, 2000; Laurence, 2006; Kabir *et al*, 2015; Bainton e Holcombe, 2018; Getty e Morrison, 2020). A última etapa do ciclo de vida de uma mina é subdividida em desativação, recuperação, fechamento e pós-fechamento (Mudder e Harvey, 1998). A desativação nesse caso é referente ao período de transição entre o término das operações de lavra e o fechamento final, enquanto que a recuperação consiste na tentativa de reestabelecer o meio físico e a vegetação. A sub etapa do fechamento é aquela onde as medidas de recuperação da área tenham sido efetivadas e é iniciada a implementação do monitoramento da área, bem como de

suas águas superficiais ou subterrâneas. O pós fechamento é iniciado a partir da dispensa de monitoramento da área e completa integração ao ambiente.

O estudo de Heikkinen *et al*, (2008) define fechamento de mina como o término de todas as atividades relacionadas a recuperação e monitoramento da área. O trabalho de Oliveira Júnior (2002) pontua o fechamento de mina como um processo que acompanha todo o ciclo de vida do empreendimento mineiro que deve ser desenvolvido desde o planejamento inicial da atividade. O ciclo de vida de uma mina é dividido em 4 etapas (Tabela 5).

A primeira etapa é definida como prospecção e consiste na busca por anomalias minerais com base em mapas, literatura, levantamentos aéreos, geofísicos e geoquímicos. A fase de exploração é implementada ao serem definidos os locais anômalos e possui como objetivo a cubagem e valoração do insumo mineral (Hartman e Mutmansky, 2002). Nessa etapa são feitos investimentos em pesquisa que consistem principalmente na execução de sondagens, abertura de trincheiras e poços e uso de métodos geofísicos e geoquímicos para melhor delimitação da jazida. A coleta de amostras permite a caracterização do minério e estimativa de teor, por exemplo. A união dessas informações adquiridas com a pesquisa mineral permite a realização do estudo de viabilidade econômica da mina, cujo resultado indica a continuidade ou abandono do projeto.

O estudo de viabilidade econômica deve demonstrar que o projeto pode ser construído e operado de maneira técnica e economicamente viável. Esse estudo é a base para apropriação de capital e deve fornecer os valores do orçamento para o projeto de implementação do empreendimento, estimados com uma precisão entre 10% a 15%. Deve ainda apresentar estimativa de reserva de minério, cujos cálculos são intrínsecos ao método de extração e o contexto geotécnico do local, teor de corte e estimativa da recuperação geral no método de beneficiamento. É apresentado também a escala do projeto, orçamento de construção, cronograma do projeto, estimativas de mercado que considerem variantes do mercado externo, estudo de fluxo de caixa, análise de risco e sensibilidade, a considerar questões ambientais e sociais intrínsecas ao fechamento da mina (Hartman e Mutmansky, 2002).

Tabela 5: Etapas do ciclo de vida de um empreendimento mineiro

Etapa	Fases	Procedimentos	Resultados
Prospecção	Estudos Preliminares	Análise dos Ambientes Geológicos	Seleção das Províncias Minerais
	Reconhecimento Geológico	Métodos Diretos e Indiretos de Prospecção	Escolha do Alvo
Pesquisa Mineral	Exploração	Mapeamento Geológico	Ocorrência Mineral
	Delineamento	Definição Geométrica do Corpo Mineral	Depósito Mineral
	Avaliação	Quantificação e Caracterização Tecnológica	Jazida Mineral
Lavra	Projeto e Desenvolvimento	Planejamento das frentes de lavra	Abertura da Mina
	Exploração	Produção do Minério	Mina em Atividade
Descomissionamento	Desativação	Operações de Desmobilização da Lavra	Fim da Atividade de Exploração
	Fechamento	Recuperação Ambiental	Liberação da área da mina para outra finalidade

Fonte: Adaptado de Flores, 2006; Heikkinen *et al*, 2008; Sanchez *et al*, 2013.

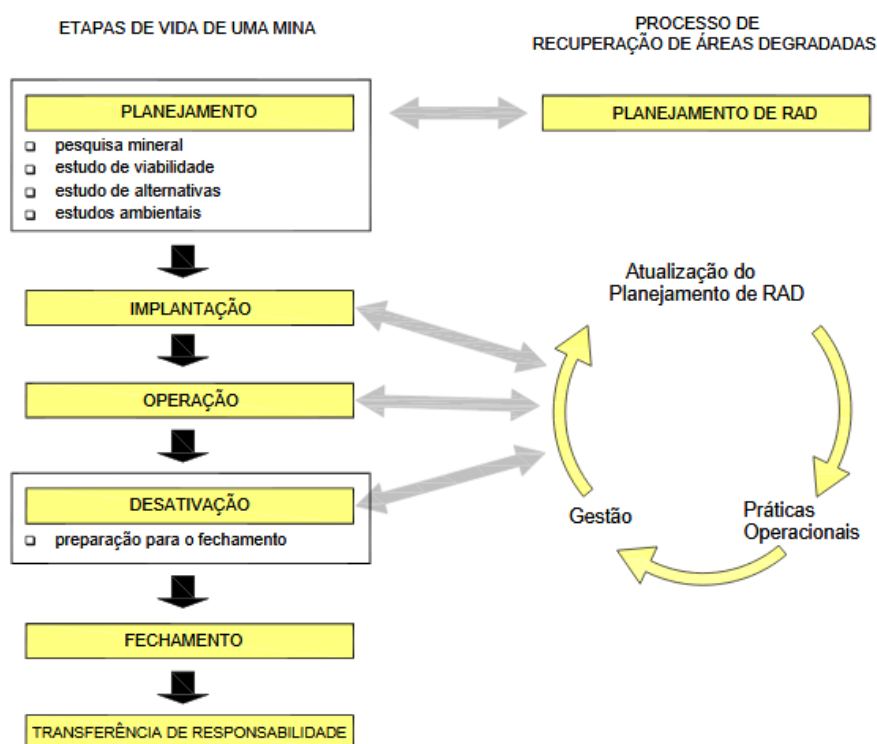
As obras de preparação para a lavra e construção da infraestrutura necessária são iniciadas quando existe aceite de continuidade do projeto. Aberturas de vias de acesso e planta de beneficiamento são implementadas, assim como construção de prédios de apoio e preparação da área de disposição de estéreis e rejeitos (Australia, 2006). Em seguida é iniciada efetivamente os processos de extração e beneficiamento do minério, que trazem o lucro para empresa após investimentos em pesquisa mineral e implementação do empreendimento. A reserva mineral deve ser revista através da atualização do modelo geológico com base em novas pesquisas conforme o avanço da mina durante sua fase operacional (Neri, 2013).

Por fim, a etapa de descomissionamento da mina é vista como uma atividade dispendiosa, uma vez que nessa fase não há mais geração de renda advinda da atividade minerária e são gerados custos com a recomposição e monitoramento da área. As principais atividades desenvolvidas nessa etapa consistem na demolição e/ou remoção das infraestruturas da mina, reconfiguração topográfica, recuperação e remediação da área (Fourie e Brent, 2006). Além dos efeitos ambientais decorrentes dessa etapa, é possível destacar os impactos econômicos e sociais. Muitos

municípios obtêm da mineração sua principal fonte de renda e enfrentam desemprego e redução populacional após o fechamento do empreendimento.

Diante disso, é esperado que o projeto de recuperação das áreas degradadas seja desenvolvido no início do planejamento do empreendimento e aprimorado com o decorrer da operação (Figura 11).

Figura 11: Ciclos de vida do empreendimento mineiro



Fonte: Neri (2013)

4.3.1 Tipos de fechamento

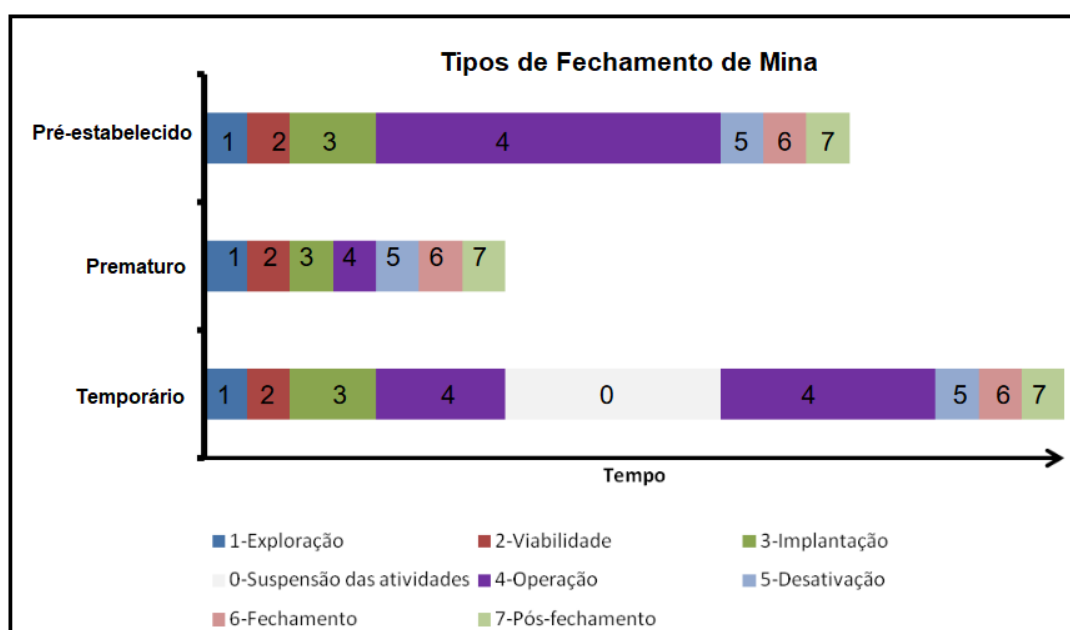
Existem vários fatores que podem determinar o fechamento de um empreendimento mineiro, dentre eles exaustão do minério, questões geológicas, geotécnicas e econômicas (Laurence, 2006). Com relação as questões econômicas, é importante ressaltar que muitos minérios são tratados como *commodities* e possuem seu preço regulado no mercado externo (Dias, 2013). A oscilação do preço do minério

no mercado externo pode acarretar na inviabilização das operações de minas no Brasil.

A diminuição do teor de corte e a superestimação de reservas devido ao baixo investimento em pesquisa mineral são fatores geológicos que podem levar ao fechamento de mina. O rompimento de taludes, presença de descontinuidades no maciço e desmoronamento de blocos podem ser fatores geotécnicos de fechamento de uma mina, devido ao comprometimento da segurança do empreendimento. Exemplo disso ocorreu no Chile em 2010 quando após o acidente na Mina de San José, que deixou 33 mineiros presos a 688 metros de profundidade o governo ordenou o fechamento de 30 outras empresas de mineração de cobre de pequeno porte devido as condições precárias de segurança (Soto, 2010).

Diante disso é possível estabelecer 3 tipos de fechamentos de minas: os pré-estabelecidos, prematuros ou temporários (Figura 12).

Figura 12:Diferentes tipos de fechamento de mina



Fonte: Adaptado de Neri (2013)

A Figura 12 apresenta as principais diferenças entre os tipos de fechamento de mina. No fechamento de mina pré-estabelecido é possível verificar a existência de todas as fases do ciclo de vida da mina sem interrupções. O encerramento das operações no empreendimento ocorre de acordo com o previsto no plano de

fechamento de mina. De acordo com Laurence (2006), 25% das minas são fechadas devido à exaustão do minério.

O segundo tipo de fechamento é o prematuro, que ocorre quando as atividades de extração terminam antes do previsto no plano de fechamento, predominantes frente aos fechamentos pré-estabelecidos. O fator econômico predomina no caso do fechamento prematuro. Estudos sobre fechamentos de minas australianas mostraram que durante a crise econômica global ocorrida entre 2008 a 2009 foram fechadas minas de níquel, cobre, carvão e ouro (Laurence, 2006). O critério econômico foi definitivo para o fechamento das minas de níquel e cobre.

Por fim, o fechamento temporário da mina requer a execução de várias medidas de cuidados e manutenção, como por exemplo, bombeamento contínuo da água da cava a fim de que ela não seja submergida e permita a retomada das operações. Os principais motivos do fechamento temporário são técnicos ou econômicos, num cenário de expectativa de retorno em até 3 anos.

A mina Ravensthorpe (Austrália) é um exemplo de suspensão temporária de atividades. Após sua abertura no ano de 2009, suas atividades foram suspensas devido à crise econômica. No entanto, medidas de manutenção e segurança foram executadas e mais de 100 trabalhadores foram realocados para outras minas com o objetivo de retornarem a Ravensthorpe, com vida útil estimada em 25 anos (Sánchez, 2013).

No Estado de Minas Gerais em 2009, 234 minas possuem atividades suspensas temporariamente num total de 1.739 concessões de lavra. No entanto, não existem informações sobre medidas de manutenção e monitoramento adotadas nessas áreas o que causa preocupação ambiental (Resende e Lima, 2009). Diante da ausência no acompanhamento, minas com fechamento temporário podem ser convertidas em minas abandonadas (Clark *et al*, 2000). No Brasil, a mina Jazida de Pirita localizada em Ouro Preto-MG foi abandonada na década de 60 e trouxe como consequência instabilidades na cava e drenagem ácida. A prefeitura do município avalia o uso dessa área para a disposição de resíduos da construção civil, com o objetivo de minimizar impactos na percolação de drenagem ácida (Moraes *et al*, 2010).

4.3.2 Plano de Fechamento

A apresentação do plano de fechamento de mina é obrigatória para concessão de lavra, ou seja, para o direito exploratório da área requerida no Brasil. Esse plano deve ser apresentado como parte integrante do Plano de Aproveitamento Econômico (PAE) logo após a aprovação do Relatório Final de Pesquisa pela ANM (Agência Nacional de Mineração). Segundo a ANM, o plano deve ser feito com base na Resolução ANM nº 68 de 30 de abril de 2021 (ANM, 2021) e deve conter, além da intenção de uso futuro da área, os seguintes itens:

- Relatório dos trabalhos efetuados;
- Caracterização das reservas remanescentes;
- Plano de desmobilização das instalações e equipamentos que compõe a infraestrutura do empreendimento mineiro e seu destino final;
- Atualização dos levantamentos topográficos da mina;
- Planta da mina que conste as áreas lavradas recuperadas, a recuperarem, áreas de disposição do solo orgânico, estéril e rejeitos;
- Programas de monitoramento dos taludes, nível freático, drenagem das águas;
- Plano de controle da poluição do solo, atmosfera e recursos hídricos;
- Medidas para impedir o acesso de pessoas estranhas a mina;
- Impactos ambientais nas áreas de influência (meio físico, biótico e social);
- Relatório de condições de saúde ocupacional dos trabalhadores durante a vigência do empreendimento;
- Cronograma físico e financeiro das atividades propostas.

A ANM considera que o Plano de Fechamento de Mina deve ser atualizado a cada 5 anos de atividade da mina e o projeto final executivo deste plano deve ser apresentado 1 ano antes da data prevista para o encerramento do empreendimento (Neri, 2013).

Além do Brasil, outros países do hemisfério norte e Austrália apresentam forte relação com a mineração e possuem o conceito de fechamento de mina mais difundido nas leis e nas empresas. Apesar desse conceito ser relativamente novo, os problemas ambientais e sociais advindos do encerramento das atividades mineiras geraram

respostas mais rápidas e efetivas na Austrália, Canadá e EUA quando comparadas ao Brasil (Clark e Clark, 2005).

A Austrália demonstra maior rigidez quanto a legislação para atividades minerárias dentre os 3 países analisados. O governo australiano aumentou as responsabilidades dos órgãos reguladores da mineração e do meio ambiente através dos *Mining Acts*, a partir da década de 80. No entanto, os Estados possuem autonomia para legislar as atividades mineiras de seu território e os municípios ficam incumbidos na aprovação de projetos. No Estado de Western Austrália por exemplo, o departamento estadual criou a Lei denominada *Mining Rehabilitation Fund Act* 2012 (MRF), com vistas a solução de problemas relacionados ao abandono de minas. Essa lei exige que as empresas mineradoras apresentem anualmente o valor da área explorada, e quando esta área for superior ao planejado a empresa deverá pagar um imposto do excedente, destinado a um fundo de recuperação das áreas (Western Australia, 2016).

No Canadá cada estado possui a responsabilidade nos processos de recuperação de áreas ocupadas pela mineração. Em 2002 foi criado a *National Orphaned/Abandoned Mines Initiative* (NOAMI), único órgão mundial responsável por criar uma base de dados de minas abandonadas, identificar os principais problemas e propor soluções. A NOAMI é composta por representantes do governo canadense, empresários da indústria mineira, sociedade, povos locais e órgãos não governamentais (Cowan *et al*, 2010).

O plano de recuperação da área a ser lavrada também é exigido nos Estados Unidos antes do recebimento da autorização de lavra (Flores, 2006). Mesmo com a autonomia individual de cada estado, vários artigos federais são base para as ações estaduais, como por exemplo o *Clean Water Act*, *Clean Air Act* e *Surface Mining Control and Reclamation* (SMCRA). Existem ao todo cerca de 500 mil minas de carvão abandonadas pelo território norte americano e a SMCRA foi criada para definir as diretrizes para a recuperação destas áreas (EUA, 2017). A SMCRA arrecadou até o ano de 2015 mais de 9 bilhões de dólares em tributos pagos pelos mineradores de carvão, dos quais em torno de 4 bilhões foram gastos em recuperações de áreas abandonadas.

4.3.3 Exemplos de Efetividade

Cerca de 400 minas estavam abandonadas ou paralisadas no Estado de Minas Gerais entre 2014 e 2015, das quais aproximadamente 75% foram categorizadas em situação de abandono sem controle ambiental estabelecido. Nos Estados Unidos existem mais de 55 mil áreas de mineração abandonadas que geram gastos na ordem de bilhões/anuais para recuperação. Na Austrália existem cerca de 50.000 minas abandonadas e é estimado que 10 bilhões de dólares sejam gastos para a recuperação das minas somente do Estado de Queensland (Unger *et al*, 2012).

Apesar da Constituição Federal Brasileira de 1988 estabelecer no parágrafo segundo do Art.225, que *“aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado”*, são poucas as minas brasileiras que tiveram efetividade no seu processo de descomissionamento (Weber e Brandt, 2012).

A Mina de Águas Claras (MAC) é citada por Castro *et al*, (2011) como um dos poucos exemplos de sucesso no fechamento (Figura 13). Localizada no município de Nova Lima em Minas Gerais, a mina de Águas Claras explotou minério de ferro entre 1973 e 2002 e encerrou suas atividades pela exaustão das reservas.

Devido à proximidade do empreendimento com o município e sua localização nas bordas da Serra do Curral, importante atrativo turístico da capital mineira, o fechamento da Mina de Águas Claras passou a ser uma das principais referências no desenvolvimento sustentável da indústria mineral brasileira. A execução do plano de fechamento para esta mina foi dividida em 4 itens: avaliação ambiental com abrangência de aspectos hidrológicos, geotécnicos, geológicos, bióticos e antrópicos; definição do cenário pós fechamento; avaliação dos impactos ambientais na desativação e elaboração de programas e procedimentos de fechamento e pós fechamento (Franca, 2001).

Dentre as propostas de pós fechamento da MAC, é citada a criação de um centro urbano de 194 hectares que abrigará espaços culturais, parque para feiras, edifícios comerciais e residenciais, além de um centro administrativo da companhia VALE operante no local.

A cidade de Curitiba possui aproximadamente 81 milhões de m² de área verde preservada distribuídas em 26 parques. Um destes parques é o Parque da Pedreira que atualmente abriga o famoso ponto turístico da Ópera de Arame (Dias *et al*, 2016).

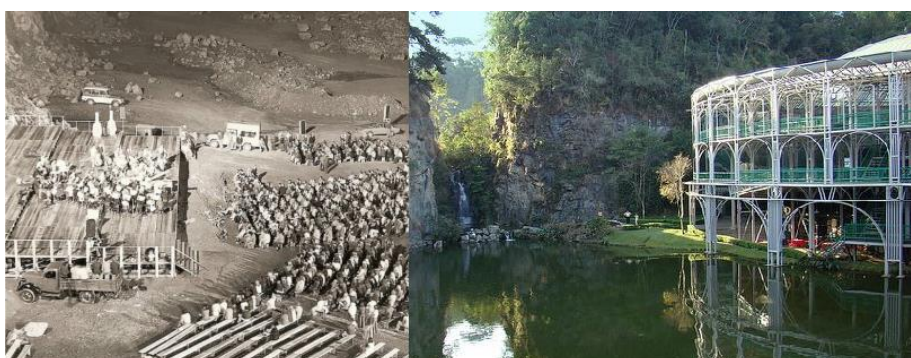
Entre os anos de 1920 e 1971 o local formado por rochas gnáissicas e migmatíticas abrigou a Pedreira Gava, que durante sua operação foi responsável por grande parte do fornecimento de blocos de paralelepípedo para o calçamento das ruas existentes no município. Com as mudanças tecnológicas a pedreira foi desativada em 1971 e através de iniciativas públicas municipais começou a ser elaborado projetos com vistas ao seu novo uso (Figura 14). O grande auditório a céu aberto foi oficialmente inaugurado em 1992 com capacidade para 2.400 pessoas. Devido a sua localização estar cercada por rochas maciças de 3 metros de altura, a Ópera de Arame apresenta excelente acústica e grande atratividade turística.

Figura 13: Vista aérea da Mina de Águas Claras e projeção futura



Fonte: modificado de Castro *et al*, (2011)

Figura 14: Parque das Pedreiras a esquerda em 1974, logo após o fechamento da Pedreira Gava e a direita em 2010 com detalhe para a Ópera de Arame

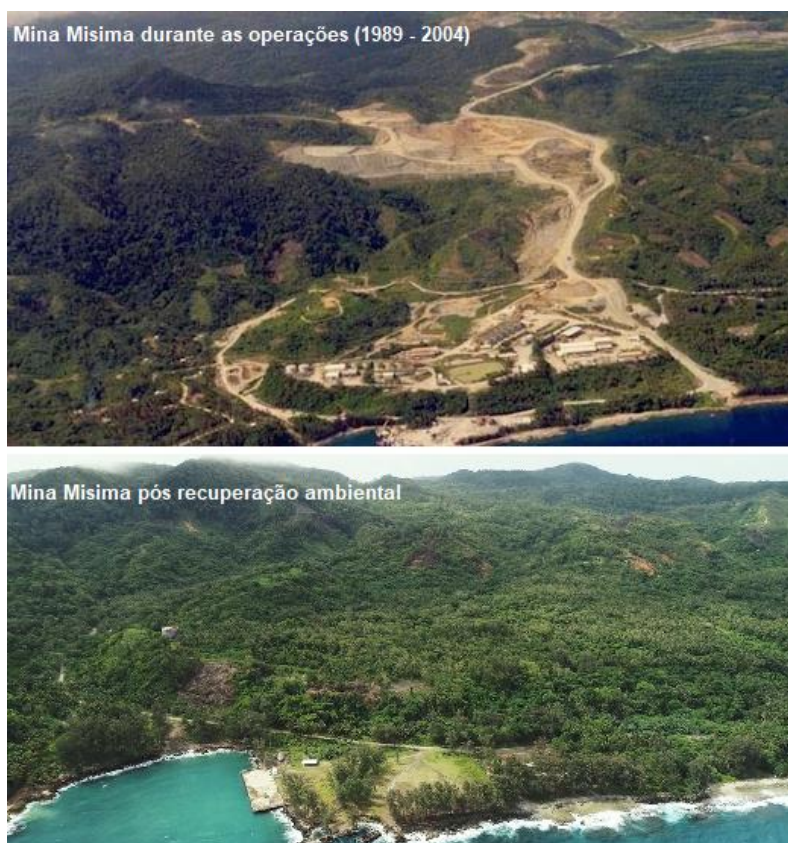


Fonte: Modificado de Salum (2010)

A mina Misima em Papua Nova Guiné produziu aproximadamente 3,7 milhões de onças de ouro nos anos de 1989 a 2004 (Botta *et al*, 2014). A população dependia da agricultura de subsistência e do comércio com as ilhas vizinhas antes da atividade mineira. Um comitê de sustentabilidade foi criado para apoiar o desenvolvimento sustentável das comunidades locais durante a operação da mina. Pós fechamento a recuperação ambiental foi bem-sucedida, uma vez que o reflorestamento e a revegetação começaram a ser realizados antes do fechamento definitivo da mina (Figura 15). Com a realização do nivelamento do terreno foi possível tornar a terra agricultável e possibilitou a piscicultura através da criação de um lago formado em uma fossa, com o objetivo de auxiliar comunidade local (Jackson, 2002).

No âmbito social a empresa proporcionou aos seus funcionários treinamentos e bolsas de estudo, enquanto operava na região. Com isso, mais de 300 habitantes treinados conseguiram prosseguir com suas atividades mineiras mesmo pós fechamento da mina.

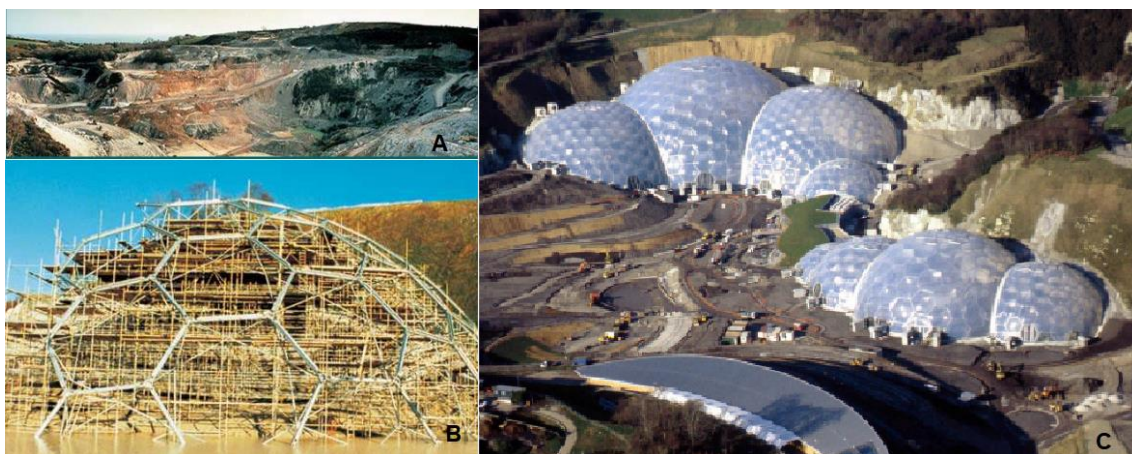
Figura 15: Vista área da Mina Misima - durante e pós operações



Fonte: elaborado pelo autor

Uma mina de caulim ativa por 170 anos localizada na Inglaterra também é destaque como exemplo de sucesso em seu fechamento. A mina que era responsável por fornecer grandes volumes de matéria prima para fabricação de porcelanas encerrou suas atividades em 1995, com a exaustão do minério (Dias *et al*, 2016). Nesse mesmo período o governo procurava por locais que pudessem abrigar um parque com exposição das plantas mais importantes do mundo todo e devido a extensão da mina exaurida ela foi escolhida para a implementação do projeto intitulado Éden (Knebel e Sanchez, 2001). A solução adotada foi a construção de estruturas em formato de bolhas, adaptável a qualquer terreno diante da superfície irregular formada pelos taludes da antiga mina de caulim (Figura 16). As grandes atrações do Projeto Éden são os biomas externos e internos, a restauração paisagística da cava da mina, bem como a consolidação de projetos de pesquisa, educação e conservação no local. Além disso, o projeto serviu para fortalecer a economia da cidade com a criação de empregos e desenvolvimento do turismo após o fechamento da atividade mineira. No primeiro ano de operação, o Projeto Éden atraiu cerca de dois milhões de visitantes e no segundo, pouco mais de um milhão e meio (Blewitt, 2015).

Figura 16: A - Mina de caulim em 1995; B - Construção das estruturas em formato de bolhas; C - Projeto Éden finalizado



Fonte: Modificado de Salum (2010) e Knebel e Sanchez (2001).

4.3.4 Descomissionamento de Minas de Urânio

A maioria das minas de urânio iniciou suas operações na década de 40 e após uma queda nos preços do minério tiveram um decréscimo em suas atividades (Franklin e Fernandes, 2013). No entanto, de acordo com a Agência de Energia Atômica Internacional (IAEA) é esperado uma retomada no setor nos próximos anos diante da chamada “Renascença nuclear”, uma alternativa as fontes energéticas atuais. As consequências ambientais advindas destas antigas operações mineiras de urânio foram várias, grande parte delas devido à ausência de legislações e despreocupação com o meio ambiente.

O programa de remediação WISMUT GmbH é citado por Paul, Mann e Jakubick (2009) como um dos maiores exemplos de programas de fechamento e remediação de minas de urânio no mundo. Criado na década de 90 durante a reunificação da Alemanha com o objetivo de reabilitar as áreas que pertenciam a empresa de mineração soviética-alemã SDGA WISMUT no antigo território da Alemanha Oriental (Figura 17). Entre os anos de 1946 e 1990 a SDGA WISMUT produziu aproximadamente 216.000 toneladas de urânio, classificada na época como terceira maior produtora mundial (Hagen *et al*, 2005). O complexo produtor da empresa soviética-alemã envolvia 5 minas subterrâneas, com aproximadamente 80 milhões de m³ escavados, 1 mina a céu aberto, 2 plantas de processamento e mais de 60 pilhas de estéril, num total de cerca de 3.700 hectares de áreas operacionais contaminadas.

Figura 17: Localização das antigas minas de urânio pertencentes a SDAG WISMUT



Fonte: Adaptado de Paul, Mann e Jakubick (2009)

Dada a localização geográfica deste complexo em áreas densamente povoadas, o programa federal WISMUT GmbH teve os seguintes objetivos:

- Descomissionamento das minas;
- Tratamento das águas;
- Desmontagem e demolição dos edifícios e estruturas contaminadas;
- Remediação dos depósitos de estéréis e bacias de rejeitos;
- Monitoramento ambiental contínuo.

Durante os trabalhos de demolição das estruturas, foram obtidos mais de 370.000 m³ de madeira, concreto e alvenaria, bem como 265.000 toneladas de sucata. Estes materiais foram separados em contaminados e não contaminados, com base em valores de referência da atividade de radiação alfa. Materiais não contaminados seguiram para reciclagem ou construção de estradas, enquanto que o restante foi realocado e contornado superficialmente, de modo a garantir o confinamento e maximizar o número de áreas recuperadas (Paul, Mann e Jakubick, 2009).

Aproximadamente 1 bilhão de toneladas de estéril e minério de baixo teor foram gerados durante a operação das minas como consequência dos baixos teores de minério nos depósitos de WISMUT. Neste caso, as principais questões ambientais foram a reutilização das superfícies destes depósitos, garantia de estabilidade geotécnica, limitação de exposições radioativas a sociedade e compreensão dos possíveis efeitos nas águas subterrâneas e superficiais a jusante dos depósitos de estéril. Para a remediação destes problemas duas soluções foram adotadas baseadas nas características de cada mina: execução do preenchimento e reconfiguração geomecânica e vegetal (Figura 18).

Figura 18: Operação de preenchimento em antiga cava de urânio



Fonte: Adaptado de Paul, Mann e Jakubick, 2009

Os blocos de rocha estéreis e geradores de drenagem ácida foram realocados para o interior desta cava para preenchimento com início na colocação das rochas estéreis com maior potencial de geração de drenagem ácida no fundo da cava e abaixo do nível freático para evitar nova liberação de ácidos (Paul, Mann e Jakubick, 2009). Com isso, as áreas superficiais contaminadas diminuíram e foram concentradas em um mesmo espaço. Como consequência, a liberação de contaminantes e exposição radiológica foi limitada e minimizado potenciais problemas nas cavas abandonadas. Nas áreas subterrâneas adotada foi a remediação dos pilares das minas. Para isso houve uma reconfiguração geomecânica, com limites máximos de inclinação respeitados, seguido de cobertura com camadas de solo e revegetação para redução dos níveis de radiação em limites aceitáveis.

Estações de tratamento de água foram construídas em 1995 e a grande maioria delas opera com o sistema de precipitação de cal, de modo a neutralizar a água ácida, com capacidade individual de tratamento entre 100 m³/h e 700 m³/h e com estimativas de operação até 2040 (Paul *et al.*, 2015).

De acordo com dados divulgados pelo programa WISMUT em dezembro de 2020, 97% das estruturas já haviam sido demolidas, 99% do preenchimento estava completo e 86% das áreas reconfiguradas. Muitas destas áreas como por exemplo na localidade da mina de Schlema houve a reabertura e restauração de antigas termas e em Ronneburg ocorreu no ano de 2007 uma exposição nacional de horticultura que recebeu 1,5 milhões de pessoas.

A ausência de informações sobre métodos construtivos e desenvolvimento da mina ao longo dos anos são uma das consequências de operações mineiras muito antigas. Aliado a isso, a mineração de urânio potencializa o problema, uma vez que os passivos ambientais são mais prejudiciais e nocivos ao meio ambiente.

O fechamento da Mina de Urânio Ranger é um exemplo recente desses fatores complicativos. Esta mina está em operação desde 1980 na Austrália e é cercada pelo Parque Nacional de Kakadu, considerado um patrimônio mundial devido à presença de importantes sítios arqueológicos (Pepper *et al.*, 2020). Após 4 décadas e produção de aproximadamente 132 mil toneladas de urânio, as atividades foram encerradas em janeiro de 2021 e iniciado o complexo processo de descomissionamento.

Um dos principais objetivos do descomissionamento desta mina é a incorporação da área ao Parque de Kakadu. No entanto, para que isso ocorra são exigidos que os rejeitos fiquem isolados do meio ambiente por pelo menos 10.000

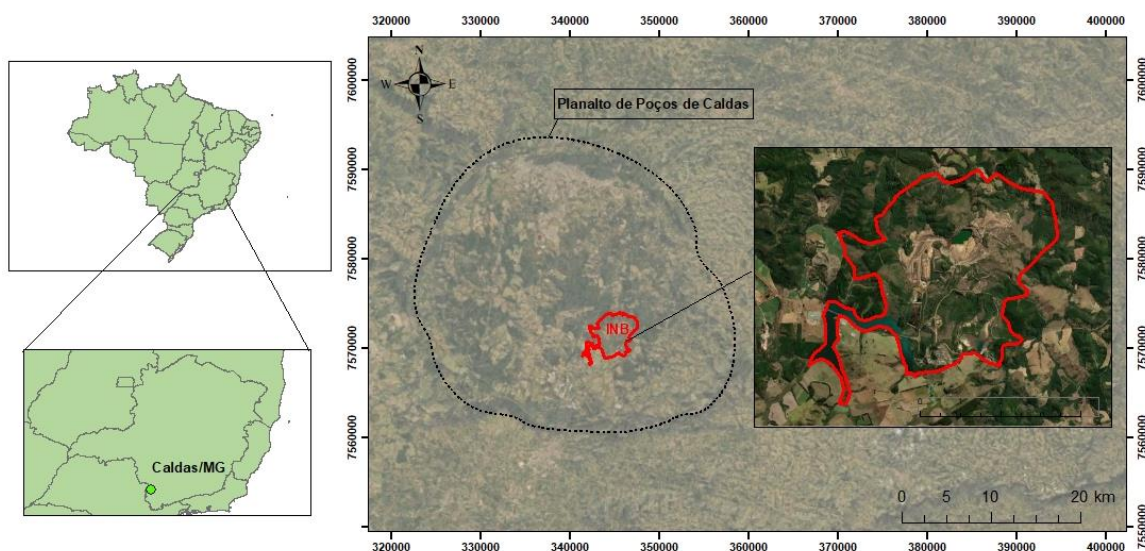
anos, com garantia de que os possíveis contaminantes não acarretarão em impactos ambientais neste período. A principal barreira a este plano de fechamento é o tempo de 5 anos para recuperação e reintegração da área. Além disso, Pepper *et al*, (2020), pontuam a ausência de informações técnicas, principalmente relacionadas a gestão de águas subterrâneas e dos rejeitos, além do plano de monitoramento da área após sua incorporação ao parque.

5 ÁREA DE ESTUDO

5.1 HISTÓRICO DA ÁREA DE ESTUDOS

O Planalto de Poços de Caldas abrange os municípios de Poços de Caldas/MG, Caldas/MG, Andradas/MG e Águas da Prata/SP, com área total de aproximadamente 700 km². O planalto é conhecido também como Maciço Alcalino de Poços de Caldas devido à presença de intrusões alcalinas originadas durante a separação das placas tectônicas sul-americana e africana (Schorscher e Shea, 1992). O maciço possui diâmetro de 35 km e apresenta ocorrências anômalas de urânio e tório. Diante destas condições, o Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas das Indústrias Nucleares do Brasil – CIPC/INB foi construído em 1959 e localizado no município de Caldas/MG (Figura 19).

Figura 19: Localização do Planalto Poços de Caldas e INB

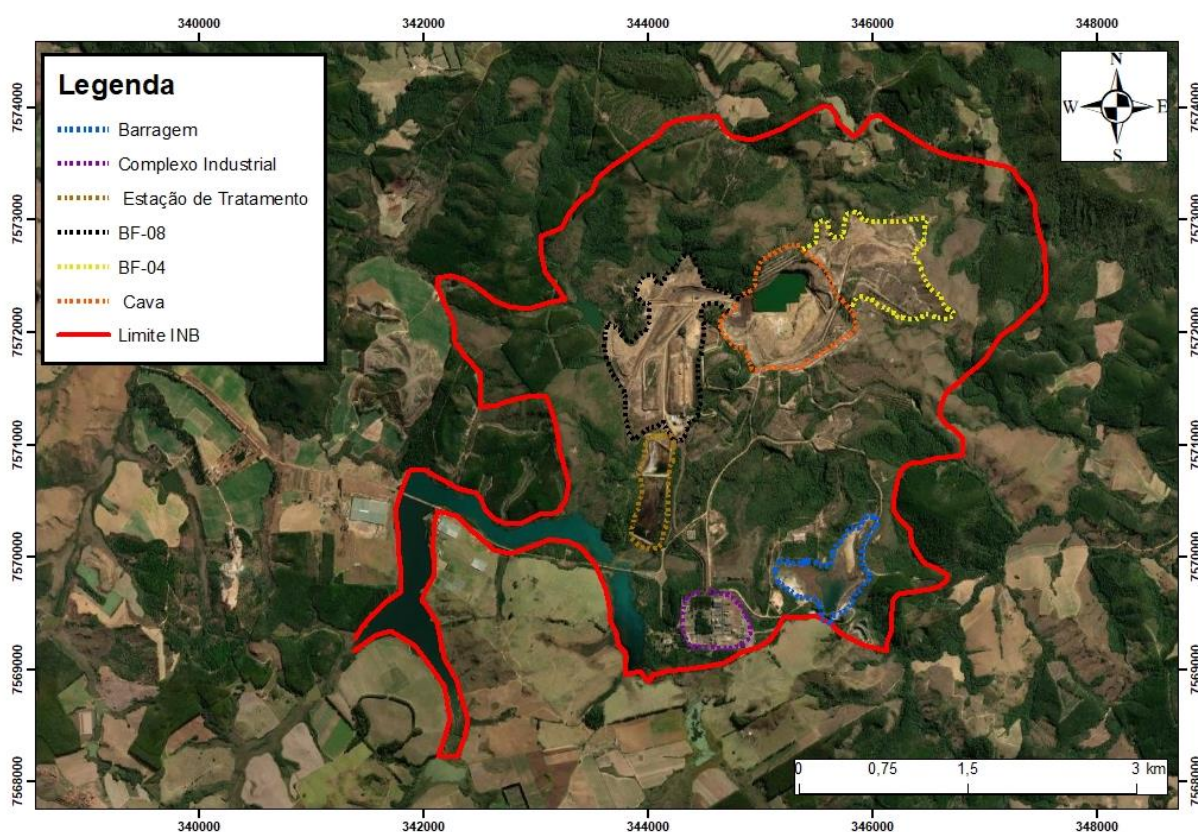


Fonte: elaborado pelo autor

O complexo ocupa uma área de 15 km² e compreende a cava da mina, pilhas de estéril denominadas de “Bota-Fora – BF”, planta de beneficiamento, barragem de rejeitos, bacias de contenção, estação de tratamento de águas ácidas –ETA e prédios administrativos (Figura 20).

A mina Osamu Utsumi – MOU está inserida neste complexo e foi operacionalizada a céu aberto com abertura de cava de 1,2 km de diâmetro. Com reserva estimada em 17.200 toneladas de urânio e operações ocorridas entre 1981 e 1995, foram removidos cerca de 45 milhões de m³ de estéril, dos quais 33 milhões de m³ provenientes do decapeamento e 12 milhões de m³ de rocha estéril (Nóbrega *et al*, 2008; Souza *et al*, 2013). As condições geométricas da cava foram estabelecidas em bermas de 5 a 6 metros e taludes de 16 metros de altura (Cipriani, 2002). O desmonte do material ocorreu por escavação direta quando friável e por explosivos quando rochoso (Franklin, 2007). O material removido da cava foi parte utilizado na construção de vias de acesso e aterros e o restante depositado nos vales em uma área de cerca de 140 ha.

Figura 20: Visão geral do complexo da INB com suas principais instalações



Fonte: elaborado pelo autor

O minério extraído era levado através de caminhões até a usina de beneficiamento com capacidade de tratamento de 750 mil t/ano. Após a cominuição realizada por britagens e moagem, o minério era disposto em pilhas de acordo com

seu teor de urânio, cuja concentração uniforme deveria ser de 400 ppm. Através de misturas com pirolusita e rocha fosfática que auxiliavam na extração do minério na etapa de lixiviação ácida, o material era adensado e gerava uma polpa com 55% de sólidos que era bombeada através de dutos até a planta de beneficiamento químico (Cipriani, 2002; Franklin, 2007).

A fase do beneficiamento químico era responsável pela produção do diuranato de amônio – DUA, conhecido como *yellow cake*. Ocorria também a recuperação do molibdênio no processo de lixiviação com ácido sulfúrico a 70°C, que resultava na solubilização do urânio na forma de sulfato de uralina. Em seguida, ocorria a filtração do licor uranífero com concentração de urânio de 0,4 mg/L (Oliveira, 2010). Após o processo de remoção orgânica do urânio com a utilização de solventes inertes, a concentração de U_3O_8 alcançava 5,5 g/L e atingia 50g/L no final do processo.

Os efluentes líquidos e sólidos produzidos no processo de beneficiamento eram encaminhados para as Unidades de Tratamento de Efluentes, onde através da adição de calcário moído era possível neutralizar o ácido sulfúrico até pH próximo a 10 e precipitar cátions metálicos. O efluente sólido advindo do processo de filtragem continha 98% do minério pobre em urânio e através da adição de cal neutralizava a acidez. Ambos os produtos eram transferidos para a bacia de rejeitos. Em 1998 a lama composta por hidróxidos de metais, elementos radioativos e sulfato de cálcio, produzida pelo tratamento químico passou a ser depositada na cava (Nóbrega, 2007).

A mina está em descomissionamento desde o término das atividades em 1995. No beneficiamento foram gerados 2,39 milhões de m³ de rejeito, tratados 2,09 milhões de toneladas de minério que produziram 1.030 toneladas de urânio (Tabela 6).

Tabela 6: Produção mineira do CIPC entre os anos de 1977 e 1997

Ano	Massa de minério tratada no beneficiamento (t)	Volume de estéreis (m³)	Massa de rejeitos sólidos (t)
1977 – 1980	0	33.736.000	0
1981	0	398.984	0
1982	401.126	3.669.332	486.500
1983	358.541	2.726.104	405.151
1984	287.558	1.164.593	324.940
1985	237.429	1.152.196	268.295
1986	97.420	277.914	110.084
1987	270.769	694.572	305.968
1988	46.309	460.196	52.329
1989 – 1992	67.019	0	75.730
1993	53.479	168.843	60.432
1994	138.552	386.377	156.564
1995	131.495	242.416	148.588
1996	0	0	0
1997	1.100	0	1.240
Total	2.090.798	45.077.300	2.395.820

Fonte: Modificado de Cipriani (2002)

Os passivos ambientais advindos da atividade mineira ocorrida no Complexo Industrial de Poços de Caldas persistem e são visíveis em grande parte da área de estudo (Figura 21).

No ano de 2005 a INB contratou um consórcio empresarial com experiência internacional em fechamentos de mina de urânio com a finalidade de elaborar e executar o plano de descomissionamento, recuperação e fechamento definitivo de suas atividades. No entanto, o contrato perdurou por apenas 1 ano e foi cancelado (Nóbrega, 2007). Apesar disso ainda ocorre o monitoramento das instalações, meio físico e materiais radioativos no complexo. Em 2012 o IBAMA aprovou o plano de recuperação da área degradada (PRAD) que definiu as ações de recuperação ambiental a serem desenvolvidas (Nóbrega, 2007).

Figura 21: Principais passivos encontrados na área: A e B - surgência de água nos taludes evidenciada em B pelas manchas de caulinita (branco), C - surgência de água na base da pilha de estéril (BF-04), D – evidências de rupturas generalizadas nos taludes



Fonte: Adaptado de Targa *et al.*,(2019) e Casagrande *et al.*,(2018)

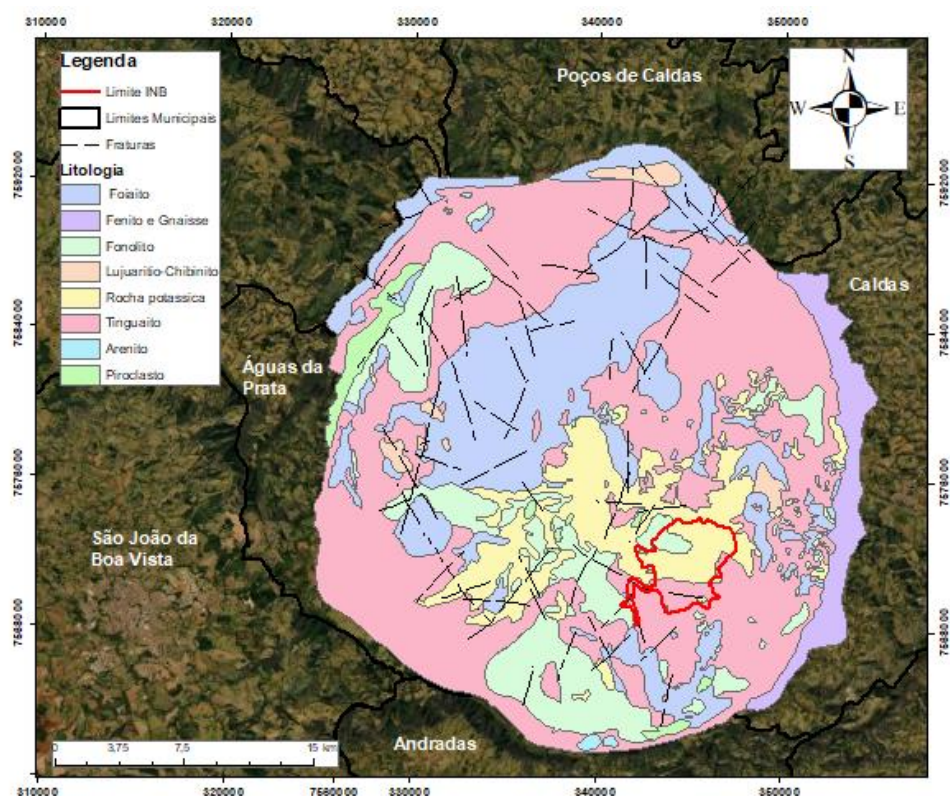
5.2 GEOLOGIA

5.2.1 Geologia Regional

O Planalto de Poços de Caldas é caracterizado pela estrutura dômica com intrusões alcalinas e fraturas nas direções principais NW e NE, delimitado por escarpas de falhas que em seu surgimento afetaram o embasamento cristalino (Freitas, 1951). O complexo alcalino está localizado na porção meridional do Escudo Atlântico, próximo a borda nordeste da Bacia do Paraná e inserido no Maciço Meridional de Guaxupé. As principais litologias existentes no planalto de Poços de Caldas são os fonólitos, tinguaítos, foiaítos, nefelina sianitos, rochas piroclásticas, bem como rochas sedimentares epiclásticas, caracterizadas pela sua composição félsica, textura homogênea e de pouca influência tectônica (Figura 22). O

embasamento cristalino que aflora nas regiões adjacentes a intrusão alcalina é composto por granitos e gnaisses, diabásio, tinguaito e anfibolito (Ellert, 1959).

Figura 22: Mapa geológico do Planalto Poços de Caldas

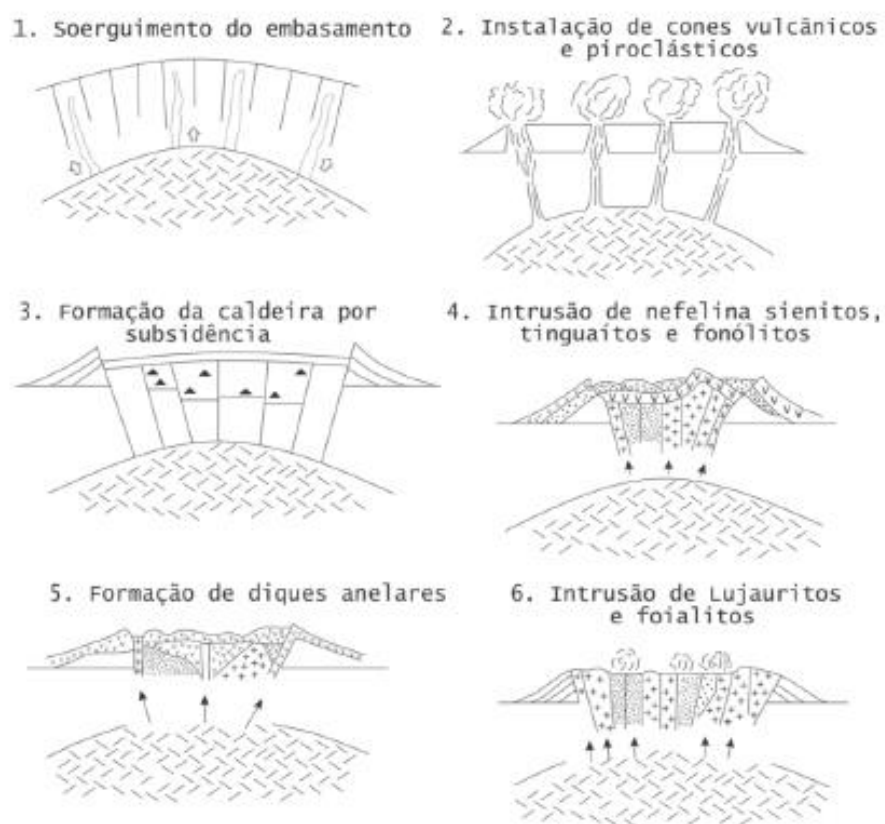


Fonte: Adaptado de Fraenkel *et al*, (1985)

A evolução do Maciço Alcalino de Poços de Caldas iniciou entre 89 Ma e 54 Ma, com a intrusão de rochas félsicas (Montes- Lauer *et al*, 1995). Em seguida, ocorreu a formação da estrutura dômica que colapsou e formou uma estrutura em formato de caldeira, intrudida por tinguaitos, nefelina sianitos e fonólitos ao longo de fendas. A formação da caldeira principal resultou no processo de subsidência do material vulcânico extravasado (Figura 23) (Holmes *et al*, 1992; Ulbrich e Ulbrich, 2000).

Três principais sistemas de falha surgiram atrelados a formação da caldeira, o mais importante de direção N60°W originado durante o processo de soerguimento. Durante o colapso da caldeira, foram geradas falhas N40°E, seguidas pela formação das falhas sub-circulares associadas as intrusões do complexo alcalino (Holmes *et al*, 1992).

Figura 23: Sequência evolutiva ilustrativa do Maciço Alcalino Poços de Caldas



Fonte: Holmes *et al*, (1992)

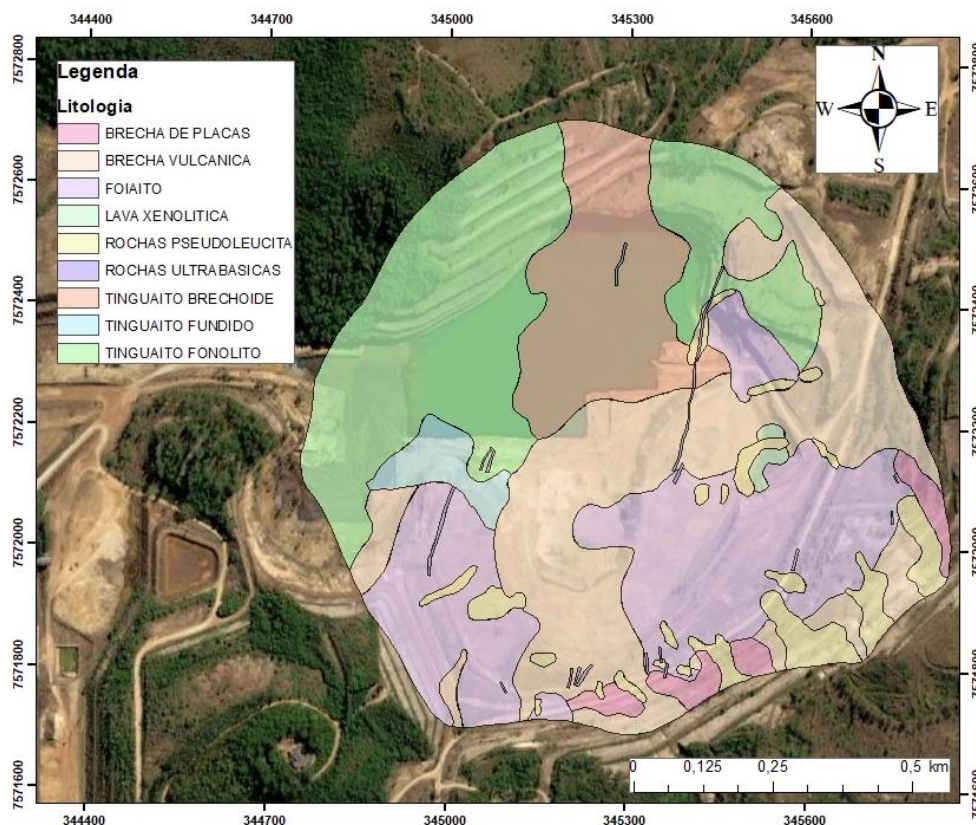
5.2.2 Geologia da Mina Osamu Utsumi

A mina de urânio Osamu Utsumi possui variedade litológica restrita, com destaque para rochas ultrabásicas, tinguaítos, foiaítos e nefelina sienitos (Figura 24) (Magno Júnior, 1985). As variedades extrusivas e hipoabissal da nefelina sienito formam os fonólitos e tinguaítos que possuem o feldspato potássico como principal fenocristal. O foiaíto, variedade textural da nefelina sienito, apresenta características leucocráticas com alterações hidrotermais (Fraenkel *et al*, 1985).

As rochas básicas presentes na mina são encontradas em pequenos diques que mesmo em profundidade apresentam característica de alteração. Próximo a superfície essas rochas possuem a capacidade de formação de horizontes lateríticos (Schorscher e Shea, 1992). Estruturalmente, as discontinuidades presentes na cava

da mina são predominantes na direção NE e NW, com atitude preferencial de N25E 55NW (Targa *et al*, 2019).

Figura 24: Mapa geológico da cava da MOU



Fonte: Adaptado de Magno Júnior, 1985

As mineralizações presentes na cava, segundo Magno Júnior (1985), estão relacionadas a várias brechas inseridas no planalto formadas por processos hidrotermais datados de 76 Ma (Ulbrich *et al*, 2002). Esses processos ocasionaram mudanças de pressão e temperatura, que aliados as emissões gasosas e soluções termais geraram brechas com diversos padrões estruturais e alta permeabilidade e permitiu a ascensão de soluções hidrotermais mineralizadas e por consequência, mineralizações. Os produtos advindos do processo hidrotermal são fluorita, zircônio, molibdênio e urânio (Capovilla, 2001). O urânio é encontrado na forma de uraninita (UO_2) e possui como impurezas o chumbo, tório, zinco e ferro.

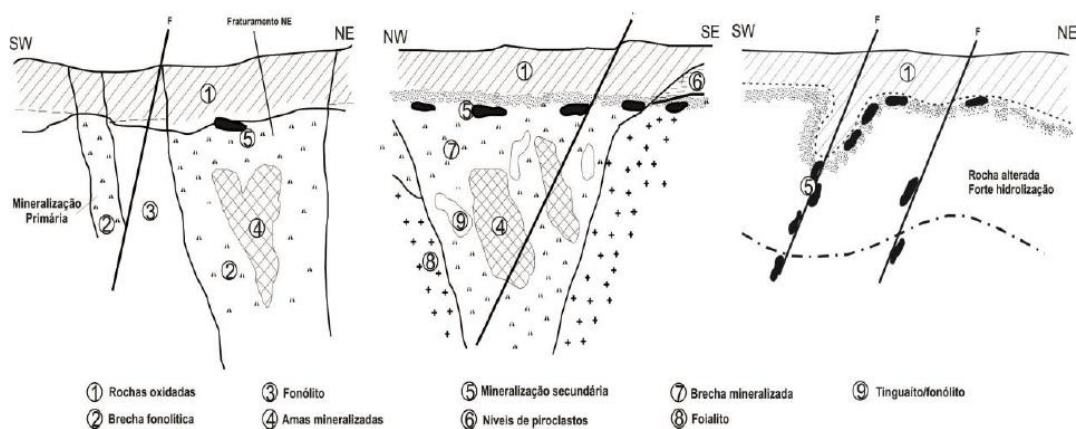
Devido a intensidade do processo de alteração hidrotermal ocorrido na mina, a distinção entre zonas alteradas e não alteradas é de difícil caracterização. Em zonas alteradas são encontrados feldspato potássico e sericita, derivada da nefelina.

Minerais de pirita e fluorita são encontrados disseminados na rocha e em cavidades das brechas, juntamente com quantidade significativa de caulinita (Schorscher e Shea, 1992).

As zonas mineralizadas presentes na cava da mina são sub-horizontais com espessura máxima de 8 metros, controladas principalmente por processos químicos, litológicos e tectônicos. Com isso, os corpos de minério foram subdivididos e denominados de corpo “A”, “B” e “E” (Figura 25).

O corpo “A” é caracterizado pela orientação subvertical a vertical e está inserido nas brechas fonolíticas, na porção oeste da cava. O corpo “A” apresenta concentração entre 700 e 800 ppm. O corpo “B” apresenta maior volume de brechas do tipo *pipe*, relacionadas a intrusões foiaíticas em zonas extremamente fraturadas. O corpo “E” por sua vez apresenta concentração de 1200 ppm de urânio e é composto principalmente por tinguaítos e fonólitos fraturados e alterados pelo processo hidrotermal (Magno Júnior, 1985).

Figura 25: Perfil ilustrativo dos corpos mineralizados "A", "B" e "E"



Fonte: Magno Júnior (1985)

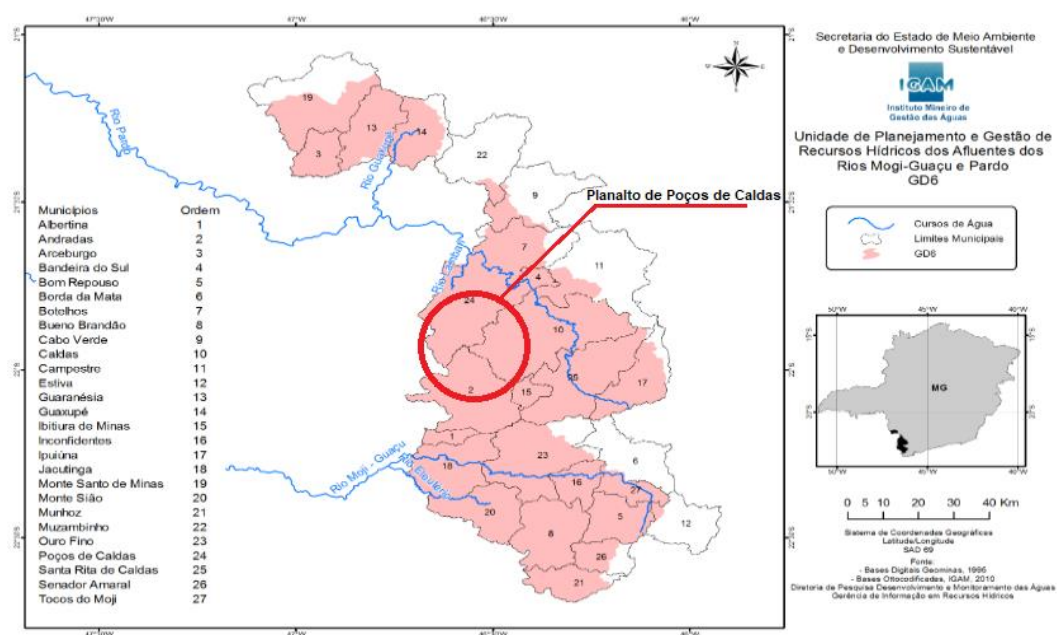
5.3 HIDROGEOLOGIA

5.3.1 Hidrogeologia Regional

O Planalto de Poços de Caldas está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Grande em sua subdivisão de unidade denominada GD6 – Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo. Essa unidade possui área de drenagem de 5.964 km² e é composta por 27 municípios (Figura 26) (IGAM, 2009).

Os principais rios presentes na região do Planalto de Poços de Caldas são o Rio Verde e o Ribeirão das Antas, responsável por drenar 75% de toda a área do planalto. O Ribeirão das Antas possui duas represas localizadas no município de Poços de Caldas: Represa Saturnino de Brito e Represa Bortolan. A Mina Osamu Utsumi está localizada no divisor de águas das bacias do Rio Verde e do Ribeirão das Antas, caracterizada pelo forte controle estrutural presente no maciço (Figura 27) (Garda, 1990).

Figura 26: Localização da Unidade de Gerenciamento 6 - GD6 com destaque para o Planalto de Poços de Caldas

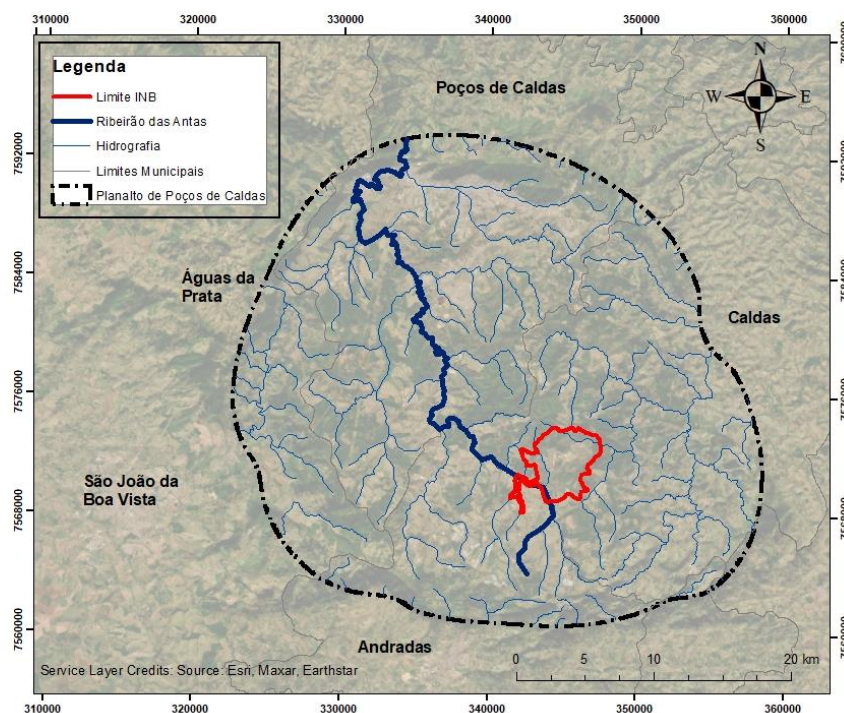


A presença de falhas e fraturas profundas advindas de esforços regionais atuantes no Maciço Alcalino Poços de Caldas, permitiu a infiltração e percolação de água subterrânea no maciço através da porosidade de caráter secundário. A junção das águas superficiais ($3 < \text{pH} < 4$) e das águas subterrâneas ($5 < \text{pH} < 6$) que utilizam as fraturas como condutos formam fluxos de descarga (Miekeley *et al*, 1992).

O aquífero presente na região apresenta caráter misto, com presença de aquífero poroso no manto intemperizado conectado a um aquífero fraturado presente nas nefelina-sienitos (Golder, 2012). De acordo com Cruz e Peixoto (1989) o aquífero é dividido em três zonas principais, a zona aquífera rasa, intermediária até 200 m de profundidade e profunda abaixo de 200m de profundidade. A Tabela 7 apresenta as principais características dessas águas juntamente com a análise das águas superficiais.

As águas superficiais e rasas apresentam pH ligeiramente ácido e percolam por um manto de alteração gerado pelo intemperismo das rochas alcalinas. Esse fluxo de água produz uma interação química principalmente com a pirita e tornam o ambiente mais redutor devido a retirada do oxigênio da água (Holmes *et al*, 1992).

Figura 27: Hidrografia do Planalto de Poços de Caldas



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 7: Características das águas superficiais (A), rasas (B), intermediárias (C) e profundas (D).

Propriedades	A	B	C	D
Temperatura (°C)	19,5	21,5	22,7	37,5
pH	6,6	6,0	7,5	9,8
Condutividade (mho/cm)	25,7	49,8	110,4	800,79
Ca ²⁺ (mg/L)	2,14	6,23	6,07	1,13
Mg ²⁺ (mg/L)	0,88	0,60	0,98	0,23
Na ⁺ (mg/L)	0,64	4,30	32,30	189,0
K ⁺ (mg/L)	1,53	4,15	2,95	6,2
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	11,48	14,47	62,66	154,91
CO ₃ ⁻ (mg/L)	-	-	12,0	133,4
Cl ⁻ (mg/L)	1,65	2,6	1,7	4,7
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	-	0,93	13,67	51,90
Fe total (mg/L)	0,81	-	1,02	0,08
Fe ⁻ (mg/L)	0,44	0,18	5,84	20,79
SiO ₂ (mg/L)	-	14,0	16,0	29,08

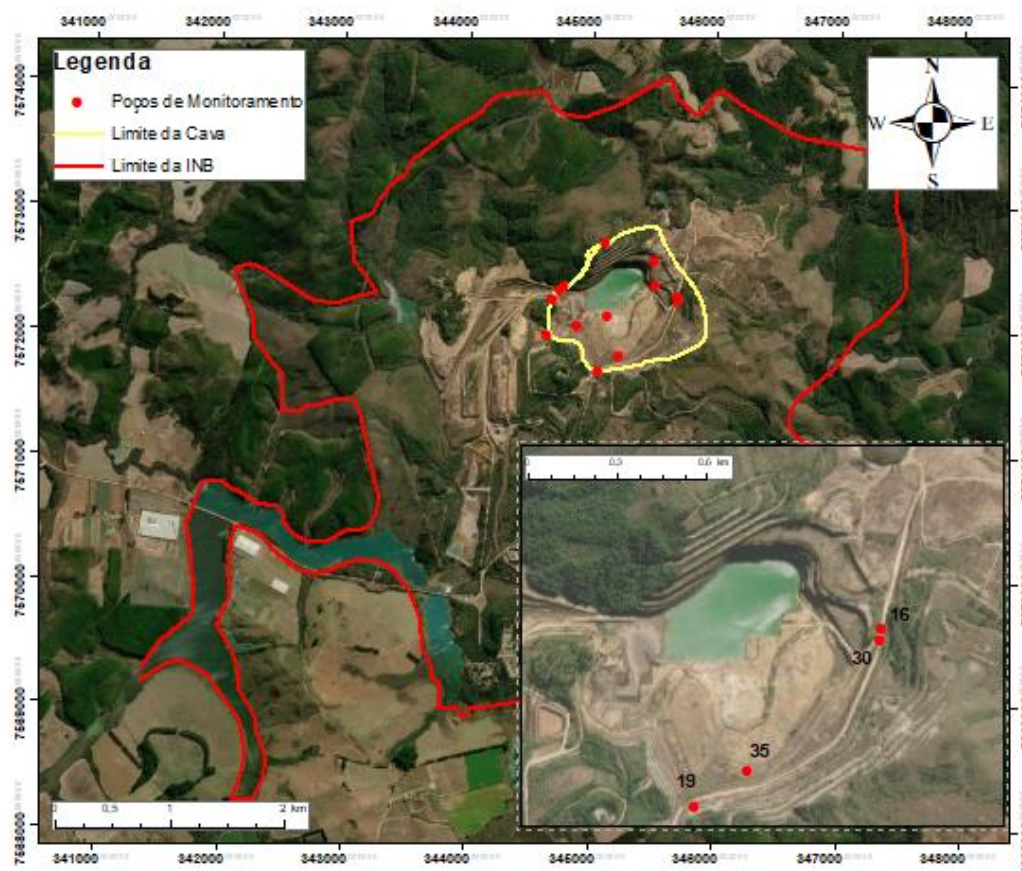
Fonte: Costa *et al*, (1998).

5.3.2 Hidrogeologia Local

No processo de implementação da Mina Osamu Utsumi houve reconformação da topografia original da área e o nível freático foi rebaixado. Como consequência ocorreu a alteração no fluxo subterrâneo das águas oxidantes e redutoras, que ao migrarem para a superfície oxidaram os sulfetos (Targa, 2019).

A área da INB possui 45 poços de monitoramento e amostragem de água subterrânea, deste total 11 estão localizados na área da cava (Figura 28 e Tabela 8). A frente sudeste caracterizada por maiores problemas geotécnicos em seus taludes apresenta 4 poços de monitoramento (PM 16, PM 19, PM 30 e PM 35), cujos perfis estão apresentados na Figura 29.

Figura 28 : Localização dos Poços de Monitoramento da INB, destaque na área da cava



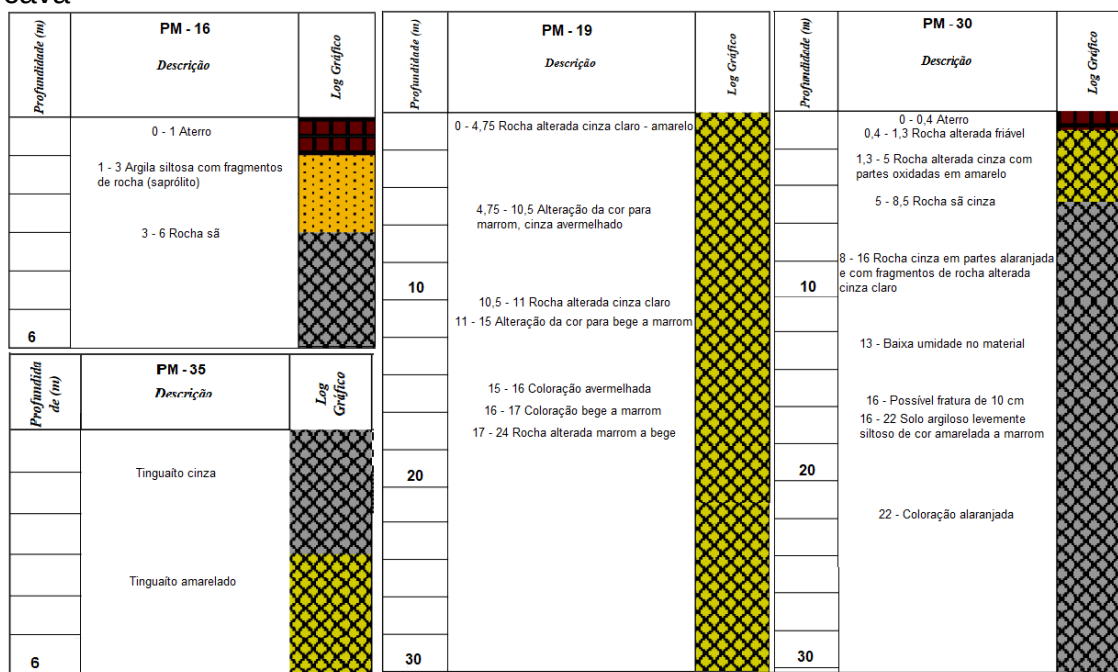
Fonte: Adaptado de Golder (2012)

Tabela 8: Características dos poços de monitoramento presentes na área da cava

Poços de Monitoramento de Água Subterrânea					
Identificação	Coordenadas		Altitude (m)	Profundidade (m)	Profundidade NA (m)
	X	Y			
PM 10	344.781	7.572.371	1335	12	6,42
PM 16	345.740	7.572.312	1366	6	1,11
PM 19	345.099	7.571.728	1383	24	7,99
PM 20	345.544	7.572.627	1376	14	12,9
PM 30	345.737	7.572.297	1366	24	0
PM 33	345.171	7.572.176	1337	18	3,27
PM 34	344.937	7.572.081	1333	12	1,64
PM 35	345.266	7.571.846	1349	6	2,22
PM 37	345.111	7.572.729	1448	36	17,41
PM 38	344.775	7.572.368	1333	30	6,38
PM 39	345.504	7.575.376	1335	12	2,27

Fonte: Golder (2012)

Figura 29: Perfis dos poços de monitoramento localizados na porção sudeste da cava



Fonte: Adaptado de Golder (2012)

5.4 GEOMORFOLOGIA

A região de estudo está inserida na província geomorfológica denominada Planalto Sul de Minas, subdividida em três unidades: Superfície do Alto do Rio Grande, Planalto de São Pedro de Caldas e o Planalto Poços de Caldas. O Planalto de Poços de Caldas é delimitado a SE e ENE pela Serra da Mantiqueira, com altitudes próximas a 2.000 metros e a oeste, pela depressão da Bacia do Paraná (Sardinha *et al*, 2016). Segundo Moraes e Jjménez-Rueda (2008) o planalto pode ser subdividido em cinco categorias de acordo com sua altitude: muito baixa (800-900 m), baixa (900-1.000 m), média (1.000-1.200 m), alta (1.200-1.400 m) e muito alta (acima de 1.400 m). Com relação a geomorfologia, há duas grandes subdivisões no interior da estrutura circular: áreas de planalto com zonas mais aplainadas ou com presença de morrotes e as áreas de planície aluvial.

5.5 CLIMA E COBERTURA VEGETAL

Segundo a classificação de Koppen, a região do Planalto de Poços de Caldas possui clima do tipo Cwb – subtropical de altitude, marcado pela ocorrência de duas estações bem definidas. No verão a temperatura média é de 20,3°C e pluviosidade total próxima a 1.430 mm, enquanto que o inverno apresenta baixa média de temperatura e índice pluviométrico, 15°C e 315 mm, respectivamente (Sardinha *et al*, 2016).

A cobertura vegetal predominante no Planalto de Poços de Caldas é denominada de Floresta Atlântica. No interior dômico a vegetação é composta por cerrado do tipo savana gramíneo-lenhosa, com árvores baixas e dispersas (IBAMA, 1990).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 MÉTODOS GEOFÍSICOS

A geofísica é correlata com todos os aspectos da física da terra, da atmosfera e do espaço. O conhecimento da Terra ocorreu através da combinação de informações adquiridas sobre as propriedades termiais, magnéticas, radioativas, elétricas, sismológicas e meteorológicas do nosso planeta. A combinação de vários parâmetros diferentes auxilia na determinação da localização de uma estrutura ou depósito com maior precisão (Telford *et al*, 1990).

A busca por depósitos minerais, gás, petróleo, água subterrânea e plumas de contaminação constitui a geofísica aplicada e é dividida nos diferentes métodos de exploração. Cada um desses métodos mensura alguma propriedade relacionada as rochas ou solos e suas configurações geológicas (Gadallah e Fischer, 2008).

A geofísica é caracterizada, segundo Ortega-Ramírez *et al.*, (2020), como um método indireto de investigação e diferencia dos métodos convencionais devido a:

- Facilidade de acesso aos locais de interesse frente a necessidade de transporte de perfuratrizes e outros equipamentos para investigação de subsolo;
- Observação contínua do subsolo ao longo de um perfil ao contrário dos métodos convencionais que são pontuais;
- Rapidez na observação, construção e interpretação do subsolo em grandes áreas;
- São métodos não destrutivos, ou seja, o uso dos métodos geofísicos não causa danos e interferências ao local investigado.

Os métodos geofísicos podem ainda ser subdivididos em ativos, quando um sinal é introduzido ao subsolo e a partir da magnitude da resposta é realizada sua interpretação, e passivos, quando é possível a mensuração de propriedades físicas do subsolo sem estímulos artificiais (Kearey *et al*, 2002).

6.1.1 Radar de Penetração no Solo - (GPR)

O Radar de Penetração no Solo – Ground Penetrating Radar (GPR) é um método geofísico baseado na emissão e recepção de ondas eletromagnéticas na faixa de 10 MHz e 2,5 GHz e é amplamente utilizado em diversas áreas como geologia, hidrologia, agronomia e engenharia civil (Bristow e Jol, 2003; Lunt, Rubin e Hubbard, 2005; Venkateswarlu e Tewari, 2014). Os primeiros usos do GPR estão atrelados a busca por objetos de metal em subsolo atribuídos a Hulsmeyer (1904) e Leimbach e Lowy (1910), bem como na investigação de espessuras de gelo nos glaciares (Rea, 1996). Desde então o avanço tecnológico aumentou as aplicações do GPR e permitiu a obtenção de imagens de alta resolução vertical e lateral do subsolo com profundidades entre 0 e 10 metros - a alcançar 40 metros em alguns ambientes geológicos (Bristol e Jol, 2003; Theune *et al*, 2006).

Esse método é aplicado em vários estudos geotécnicos com vistas a mapear fraturas e falhas presentes em subsuperfície descritos por Stevens *et al*, (1995), Grasmucck e Green (1996), Grodner (2001), Rashed *et al*, (2003) e Theune *et al*, (2006).

As equações de Maxwell descrevem matematicamente a física dos campos eletromagnéticos, enquanto que as relações constitutivas quantificam as propriedades dos materiais. A combinação de ambos fornece as bases para descrever quantitativamente os sinais GPR (Annan, 2002). As relações construtivas são os meios de descrever a resposta de determinado material ao campo eletromagnético. No caso do GPR, as propriedades elétricas e magnéticas são importantes. As Equações 5 a 7 fornecem uma descrição do comportamento dos elétrons, átomos e moléculas perante a aplicação de um campo eletromagnético.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \text{ Eq. (5)}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \text{ Eq. (6)}$$

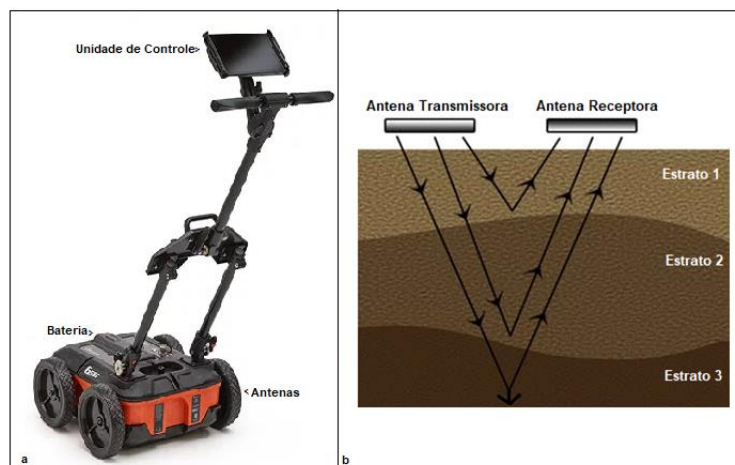
$$\vec{B} = \mu \vec{H} \text{ Eq. (7)}$$

Onde $\vec{J}$ é o vetor de densidade de corrente elétrica (A/m²), $\vec{D}$ é o vetor de deslocamento elétrico (C/m²), $\vec{B}$ é o vetor de densidade de fluxo magnético (T), $\vec{E}$ é o vetor da força do campo elétrico (V/m) e $\vec{H}$ é a intensidade do campo magnético (A/m). σ representa a condutividade elétrica e caracteriza o movimento de carga livre que

cria a corrente quando um campo elétrico está presente. $\tilde{\epsilon}$ representa a permissividade dielétrica e caracteriza o deslocamento de uma carga restrita em uma estrutura na presença de um campo elétrico. Por fim, $\tilde{\mu}$ é a permeabilidade magnética e descreve como os momentos atômicos e moleculares respondem a um campo magnético. Para a maioria das aplicações do GPR é assumido de maneira satisfatória os parâmetros μ , ϵ , e σ como constantes, com os dois últimos de maior importância.

Os equipamentos de GPR possuem quatro elementos principais: a antena transmissora, antena receptora, unidade de controle e módulo de visualização (Figura 30a). O princípio de operação do GPR consiste na transmissão de pulsos que gera ondas eletromagnéticas de alta frequência ao subsolo. Quando essa onda penetra no solo, ela entra em contato com estratos de subsuperfície que possuem condutividade elétrica e permeabilidade magnética distintas (Venkateswarlu e Tewari, 2014). Uma parte dessa energia é refletida e captada por uma antena receptora e outra parte é refratada com a profundidade (Figura 30b).

Figura 30: Equipamento GPR e esquematização do seu princípio de funcionamento



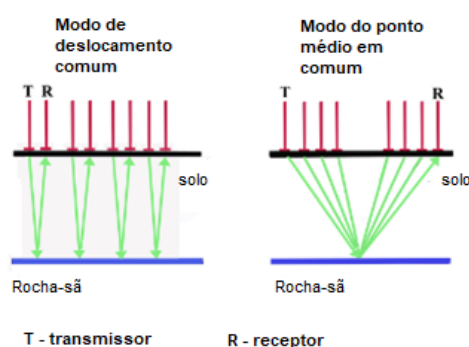
Fonte: Modificado de Karamzadeh *et al*, (2017)

Existem diferentes modos de coletar informações com o GPR, porém dois deles são mais usuais: (1) modo de afastamento comum ou (2) modo do ponto médio em comum (Figura 31). As ondas emitidas retornam sinal ao encontrarem descontinuidades ou diferenças de propriedades dielétricas entre rochas (Theune *et al*, 2006).

A relação entre as antenas de recepção e transmissão geralmente é diferente em cada modo de operação. No modo de afastamento comum, as antenas de recepção e transmissão geralmente estão inseridas na mesma unidade, conhecida como antena monostática. No modo de ponto médio comum, as antenas de transmissão e receptoras são unidades separadas e essa configuração é chamada de antena bi estáticas.

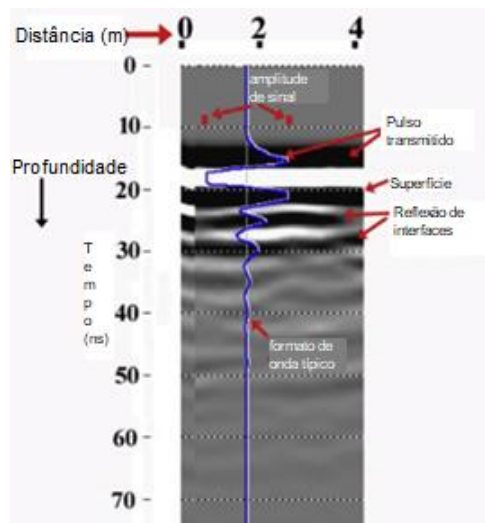
O conjunto é movido sobre o solo simultaneamente com a antena de transmissão que emite pulsos eletromagnéticos contínuos, enquanto que o receptor registra a amplitude e o tempo em que o sinal é recebido. Instrumentos GPR mais modernos possuem computadores conectados à unidade para que o usuário possa ver o sinal recebido. O sinal pode ser visto de duas maneiras: como um traço (linha azul) ou como um radargrama onde o eixo vertical é o tempo e o eixo horizontal é a distância (Figura 32).

Figura 31: Modos usuais de aquisição de dados com o GPR



Fonte: Adaptado de Mickus, 2021.

Figura 32: Sinal registrado do GPR. O traço azul (*wiggle*) corresponde a representação gráfica para a visualização do radargrama (escala de cinza). Detalhes de pulsos transmitidos (ar), reflexo da superfície e reflexo nas interfaces



Fonte: Mickus, 2021.

Na configuração do ponto médio comum, os dados podem ser coletados de duas maneiras: (1) a antena de transmissão é mantida em um local fixo e a antena receptora é afastada em distâncias crescentes; e (2) as antenas de transmissão e recepção são deslocadas ao longo do perfil, mantendo a separação entre as antenas constante. Em ambos os casos os sinais recebidos são análogos ao da primeira configuração, através de radargramas.

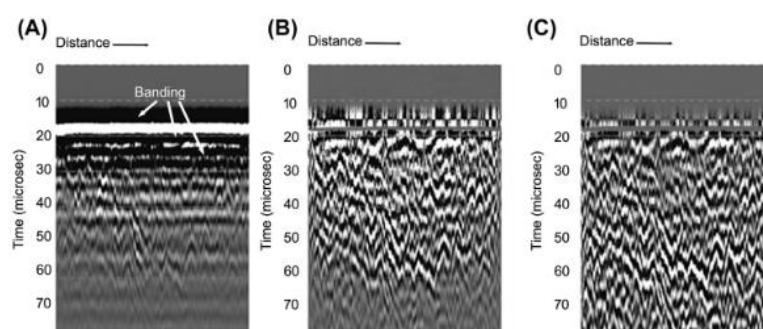
Os radargramas são a base para a interpretação e constituição do perfil da subsuperfície e sua qualidade depende das características dos pulsos refletidos e dissipados que estão atrelados às propriedades dielétricas do material investigado, do meio de investigação e dos parâmetros utilizados na aquisição (Faria *et al*, 2017).

Através do radargrama são obtidos os tempos das ondas refletidas e consequentemente é possível determinar as profundidades dos agentes refletores (descontinuidades, corpo mineral, rochas, sedimentos) a partir do conhecimento das velocidades de propagação da onda naquele material (Allred *et al.*, 2004). Cada traço presente no radargrama representa os tempos de chegada dos pulsos refletidos e conforme as antenas são deslocadas sobre a superfície são registrados diferentes traços em diferentes pontos. O conjunto de traços posicionados lado a lado em sua sequência de aquisições forma uma imagem que é tratada posteriormente com o

intuito de facilitar a interpretação e desenvolver as análises do local (Souza e Luiz, 2017).

Para processar dados obtidos com o GPR, vários métodos podem ser empregados. A maioria dos métodos são semelhantes aos realizados para perfis de reflexão sísmica. A Figura 33 mostra as etapas básicas de processamento. Durante a aquisição de dados a maioria dos sistemas GPR modernos fornecem o processamento básico para interpretações à medida que os dados são coletados. A primeira etapa de processamento consiste na edição dos traços para remover dados fora do padrão. Em seguida, são feitas correções de amplitude (espalhamento geométrico) e remoção de faixas horizontais de reflexões de superfície.

Figura 33: (A) Dados brutos obtidos com o GPR (a destacar a faixa branca que representa a superfície), (B) Dados filtrados, (C) Correção de espalhamento geométrico



Fonte: Mickus, 2021.

As velocidades de propagação das ondas eletromagnéticas dependem das propriedades elétricas dos materiais presentes em sub-superfície. A constante dielétrica está relacionada com a capacidade do solo ou rocha em armazenar carga. Quanto maior a constante dielétrica, maior é a capacidade de armazenamento de carga pelo material. Caso o material consiga armazenar cargas enquanto micro-ondas são transmitidos através dele, a propriedade dielétrica irá atuar para impedir que as micro-ondas penetrem muito rapidamente no solo em profundidade (Goodman *et al*, 2013). Por outro lado, quando um material possui propriedades dielétricas fracas ou inexistentes, as ondas eletromagnéticas percorrem em profundidade sem nenhum impedimento. As ondas eletromagnéticas ao atravessarem materiais de baixa

constante dielétrica irão apresentar maior velocidade de deslocamento e sua relação é dada pelas Equações (8) e (9):

$$v(f) = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'(f)\mu^{\frac{1+\sqrt{1+\tan^2\delta}}{2}}}} \text{ Eq. (8)}$$

onde a tangente é:

$$\delta = \frac{\varepsilon'' + \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}}{\varepsilon'(f)} \text{ Eq. (9)}$$

E ε' é a constante dielétrica real, ε'' é a constante dielétrica complexa, σ é a condutividade elétrica, f a frequência da fonte, c é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo, ε_0 é a permissividade no vácuo e μ é a permeabilidade magnética.

Materiais com condutividade elétrica desprezível e frequências entre 10 MHz a 1 GHz, a velocidade depende principalmente da constante dielétrica (Equação 10) (Davis e Annan, 1989):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \text{ Eq. (10)}$$

Onde v é a velocidade de onda eletromagnética, c é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo e ε é a constante dielétrica, intrínseca a cada material.

Ou seja, a Equação 10 demonstra que a velocidade percorrida em um determinado material é inversamente proporcional a raiz quadrada da sua constante dielétrica. A constante dielétrica do ar é 1, enquanto que a água pura ou salina apresenta uma das constantes dielétricas mais elevadas – próxima a 81 e, portanto, as micro-ondas levam mais tempo para percorrer (Goodman *et al*, 2013). A Tabela 9 apresenta as principais propriedades eletromagnéticas de materiais presentes em subsuperfície.

Tabela 9: Propriedades eletromagnéticas dos principais materiais geológicos

Material	Constante dielétrica (ε)	Condutividade elétrica ($\sigma - \text{mS m}^{-1}$)	Velocidade de propagação ($v - \text{m ns}^{-1}$)
Ar	1	0	0,3
Água pura	81	0,5	0,033
Água salina	81	30	0,01
Areia (seca)	3 – 5	0,01	0,15
Areia (úmida)	20 – 30	0,1 – 1	0,6
Gelo	3 – 4	0,01	0,16
Granito	4 – 6	0,1 – 1	0,13

Basalto	8	10	0,10
Argila	5 – 40	2 – 100	0,06
Sedimentos	5 – 30	1 – 100	0,07
Calcário	4 – 8	0,5 – 2	0,12
Xistos	5 – 15	1 – 100	0,09

Fonte: Adaptado de Ulriksen, 1982

Materiais anisotrópicos raramente exibem propriedades diretamente na proporção da fração de volume dos componentes constituintes. Ambientes ricos em argilominerais ou água subterrânea salina limitam a penetração do sinal GPR (Annan, 2002).

O GPR apresenta padrões de resposta com atividades na faixa de frequência entre 10 MHz a 1000 MHz e diante de variações de umidade em subsuperfície. Neste caso, os minerais desagregados misturados em um meio heterogêneo geralmente são isolantes dielétricos e apresentam uma permissividade na faixa de 3 a 8, além da mineralogia e grau de compactação. Além disso, determinados tipos de solos e de rochas apresentam maior porosidade que pode ser preenchida com ar, água ou outro material. A água no espaço dos poros normalmente contém íons e a condutividade elétrica da água predominam na determinação da condutividade elétrica do material (Sen *et al*, 1981).

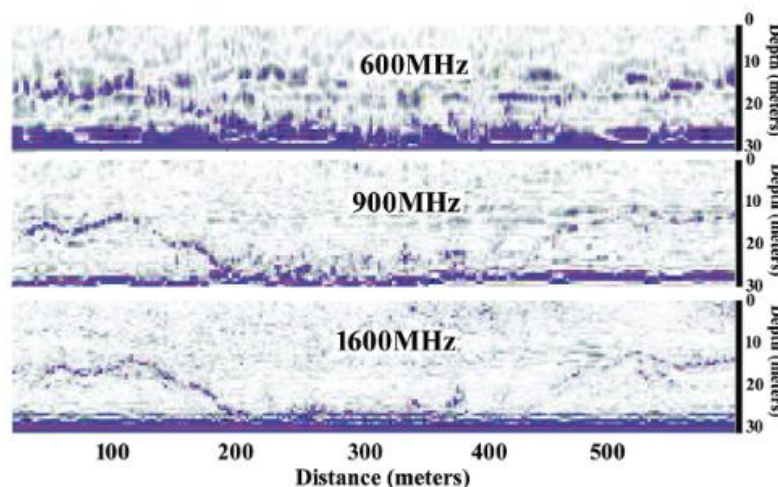
A máxima profundidade de penetração pode ser estimada ao relacionar com a condutividade e a frequência da fonte emissora (Equação 11) (Knödel *et al*, 2007):

$$d_s = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma f}} \text{ Eq. (11)}$$

Onde d_s é a máxima profundidade de penetração, μ_0 é a constante de permeabilidade magnética e σ é a condutividade elétrica e f é a frequência da fonte.

A resolução vertical varia em função da frequência e é a capacidade de distinguir dois sinais consecutivos no mesmo intervalo de tempo. As antenas GPR operam na realidade, numa largura de banda de frequência cuja qual é o centro da largura de banda. Para uma determinada frequência, o comprimento de onda do sinal depende do período (inverso da frequência) e da velocidade com que o sinal viaja através de um material. Essa resolução teórica do sinal é comumente dada por 1/4 do comprimento de onda e deve ser considerada como uma resolução máxima. A Figura 34 mostra seções de GPR adquiridas em um mesmo local, porém com três antenas de diferentes frequências. É possível observar que ao utilizar a antena de maior frequência, a resolução da imagem é melhor.

Figura 34: Seções GPR obtidas no mesmo local com antenas de diferentes frequências



Fonte: Kelly *et al*, 2021.

6.1.2 Eletrorresistividade

O método da Eletrorresistividade é baseado no parâmetro físico da resistividade elétrica (ρ) que consiste na relutância das partículas constituintes do material perante a passagem de corrente elétrica. Os valores de resistividade medidos em $\Omega.m$ são intrínsecos a cada material geológico. A maioria dos minerais formadores de rochas apresentam característica isolante e a passagem de corrente elétrica é feita por meio das soluções iônicas presentes nos poros ou fraturas dessas rochas. Desse modo, a composição mineralógica, porosidade e o grau de fraturamento consistem em agentes controladores da resistividade de uma rocha (Fernandes, 1984).

A determinação da resistividade ocorre através da medição da diferença de potencial (ddp) gerada em subsuperfície a partir da introdução de uma corrente elétrica no solo através de um aterramento galvânico (Kearey, 2002). Os diferentes valores de ddp obtidos com base em um circuito elétrico permitem identificar os diferentes materiais existentes no subsolo. Ao conectar os fios em uma fonte os campos elétricos são estabelecidos no material e produzem uma força elétrica que atuam nas cargas presentes. Esse fluxo de corrente dado pela Equação 12 é denominado de corrente elétrica e apresenta relação com o número de cargas por unidade de tempo:

$$i = \frac{dq}{dt} \text{ Eq. (12)}$$

Onde i é a corrente elétrica dada em ampère (A), q é o número de carga (Coulomb) e t é o tempo medido em segundos.

A 1ª Lei de Ohm define que a intensidade da corrente elétrica que atravessa um material é diretamente proporcional a tensão aplicada (Equação 13):

$$V = i R \text{ Eq. (13)}$$

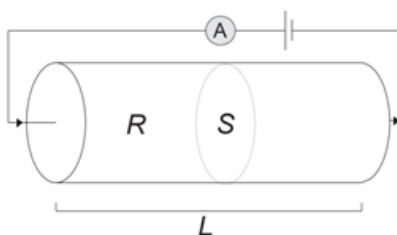
Onde: V é o valor da ddp, dada em volts (V), i é a corrente elétrica (A) e R é a resistência do material (Ω).

Ao aplicar a corrente elétrica em um corpo cilíndrico homogêneo de comprimento L e área da seção transversal S (Figura 35), é obtida a 2ª Lei de Ohm (Equação 14) que estabelece a relação entre a resistência R e a resistividade elétrica (ρ):

$$\rho = R \frac{S}{L} \text{ Eq. (14)}$$

Onde ρ é a resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$), R é a resistência do material (Ω), S é a área de seção transversal (m^2) e L é o comprimento (m).

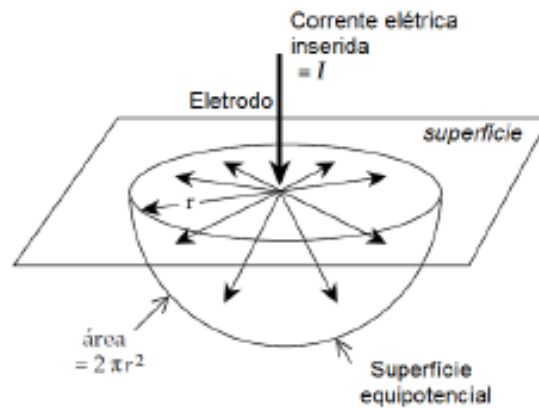
Figura 35: Circuito representativo da 2ª Lei de Ohm



Fonte: Adaptado de Musset e Khan, 2000.

A corrente elétrica aplicada em um ponto do solo cuja subsuperfície apresenta valor de resistividade constante, irá propagar em formato semisférico com superfícies equipotenciais concêntricas (Figura 36).

Figura 36: Linhas de corrente elétrica geradas após introdução em superfície



Fonte: Modificado de Lowrie, 2007.

Ao aplicar a Equação 14 no semi espaço e relacionar com a 1ª Lei de Ohm é obtida a Equação 15:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \rightarrow \rho = 2\pi r \frac{V}{i} \quad \text{Eq. (15)}$$

Onde R é a resistência do material (Ω), ρ é a resistividade elétrica (Ω.m), r é a distância entre o eletrodo e o ponto onde o ddp é medido e V é a ddp inserida em determinado ponto.

Para melhor representatividade da análise são necessários dois eletrodos com certa distância entre si para aferição dos valores de ddp (Milson, 2003). Usualmente são utilizados quatro eletrodos onde dois deles são utilizados para a medição da ddp, chamados de eletrodos de aquisição, e os outros dois eletrodos de corrente, utilizados para a propagação da corrente elétrica (Figura 37).

No meio geológico homogêneo e isotrópico a diferença de potencial entre os eletrodos M e N é representado por (Equação 16):

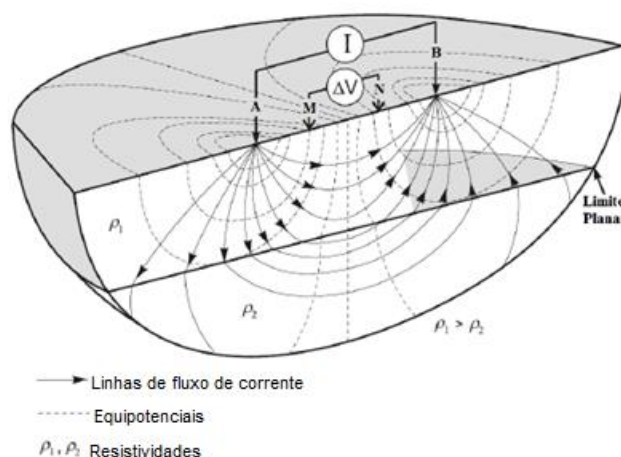
$$\Delta V_{MN} = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad \text{Eq. (16)}$$

As teorias apresentadas divergem da realidade, visto que o ambiente geológico é heterogêneo. Desta forma, a resistividade medida é influenciada pelo conjunto de materiais investigados e resulta na resistividade aparente (pa) (Equação 17):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{i} \quad \text{Eq. (17)}$$

Onde ρ_a é medido em $\Omega.m$, K é o coeficiente geométrico obtido em função da disposição dos eletrodos, V é a ddp (V) e i é a corrente elétrica (A).

Figura 37: Configuração tetraédrica de eletrodos: A-B corrente e M-N tensão



Fonte: Modificado de Knödel *et al*, 2007.

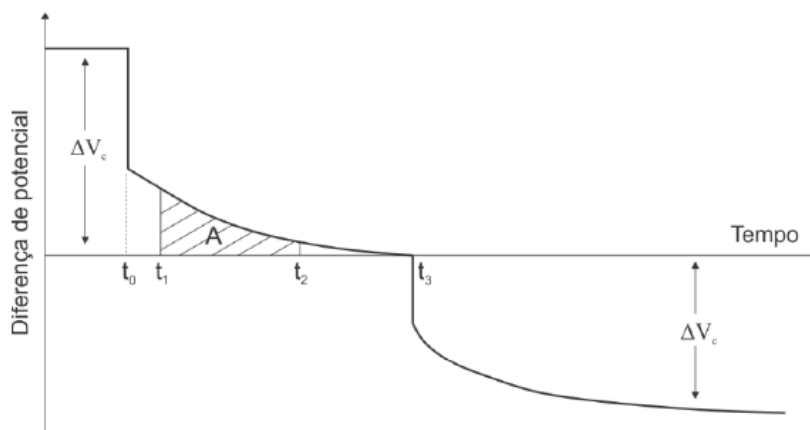
6.1.3 Polarização Induzida

O método da polarização induzida (IP) é executado com base no fenômeno da polarização elétrica em subsuperfície e é amplamente realizado na exploração de recursos minerais e estudo de águas subterrâneas. O processo é baseado no fenômeno de estimulação de tensão que ocorre após o atraso ou retardo na transmissão de corrente elétrica artificial em solos e rochas (Telford *et al*, 1990). O mesmo ocorre em um capacitor, cujas células armazenam e liberam energia quando a fonte elétrica que alimenta o sistema é interrompida. Ao descarregar, são produzidas corrente elétrica, diferença de potencial e campos magnéticos que podem ser detectados em superfície.

Quando a corrente é injetada no substrato, seu potencial aumenta rapidamente, porém demora a atingir valor máximo (V_p). Esse mesmo comportamento é observado quando a passagem da corrente é interrompida e a tensão entre os eletrodos potenciais demanda um tempo finito e mensurável para decair a zero (Figura 38), uma vez que o meio armazena temporariamente a carga elétrica e atua como um grande capacitor (Milson e Eriksen, 2013). O decaimento da tensão e o tempo para atingir o

valor máximo de tensão dependem de fatores instrumentais e geológicos intrínsecos ao solo ou rocha, o que permite realizar sua identificação.

Figura 38: Comportamento da tensão ao atingir o valor máximo e seu decaimento após a interrupção de corrente pelo sistema.



Fonte: Kearey *et al*, (2002)

A quantificação da Polarização Induzida é realizada com base nas variações de voltagem e o parâmetro físico medido é a cargabilidade (M), conforme a Equação 18 (Telford *et al*, 1990).

$$M = \frac{1}{V_o (t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (18)$$

Onde M representa a cargabilidade (mV/V), V é a diferença de potencial e o tempo (t) é medido em segundos.

Os procedimentos de aquisição de dados de IP e resistividade em campo são semelhantes e ambos podem ser realizados concomitantemente com o mesmo instrumento. Além dos eletrodos para injeção de corrente elétrica e eletrodos para a medição das diferenças de potencial, no método do IP é necessário o uso de eletrodos especiais, não polarizáveis (Figura 39), para que sejam mínimos os efeitos de correntes geradas pelos eletrodos metálicos.

Figura 39: Eletrodo não polarizável utilizado no estudo



Fonte: autoria própria

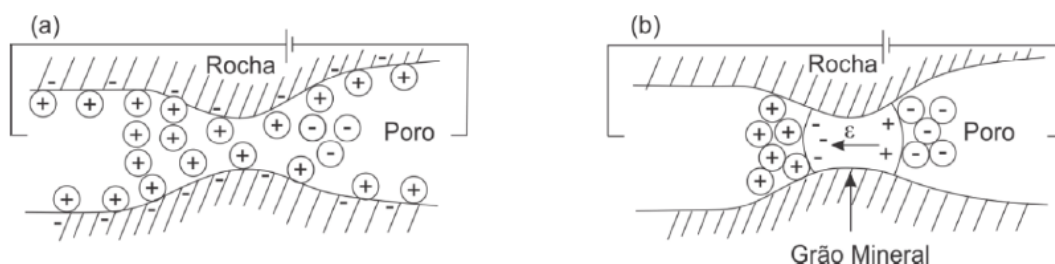
A maioria dos minerais formadores de rochas apresenta carga negativa em suas camadas mais externas em contato com os fluídos dos poros das rochas e atrai íons positivos para sua superfície (Figura 40A), o que favorece a movimentação dos íons a partir da corrente elétrica em que foram submetidos. Portanto, os íons negativos e positivos se acumulam próximo às superfícies polarizadas e, quando ocorre a remoção da corrente aplicada, retomam suas posições originais após um período finito de tempo. Assim, há um decaimento gradual da tensão cujo fenômeno é conhecido como Polarização de membrana, comum em minerais argilosos (Kearey *et al*, 2002).

Na presença de minerais metálicos, a passagem de corrente elétrica ocorre por um caminho alternativo. A Figura 40B mostra uma rocha em que um grão metálico bloqueia um poro. As cargas positivas e negativas sofrem repulsão em função da diferença de potencial criada na estrutura eletrônica do mineral e permite o acúmulo dessas cargas em lados opostos do grão metálico na tentativa de alcançar um equilíbrio. Quando a corrente é removida, os íons dispersam lentamente e ocasionam um decaimento transitório de tensão. Esse efeito é conhecido como Polarização de eletrodo e é muito comum na presença de minerais condutores, como sulfetos e óxidos metálicos. A magnitude desse efeito depende da intensidade da corrente aplicada e da disseminação de minerais metálicos para a realização das trocas iônicas, uma vez que esses grãos favorecem a movimentação de íons e, consequentemente, a geração de corrente elétrica (Kearey *et al*, 2002).

O fenômeno de polarização de eletrodo é mais evidente em rochas com minerais metálicos disseminados em função da maior disponibilidade de superfície para trocas iônicas-eletrônicas. Existe uma relação linear entre a máxima

cargabilidade aparente e a concentração de sulfetos, que permite identificar as zonas sulfetadas (Wardlaw e Wagner, 1994).

Figura 40: Mecanismos de Polarização Induzida: Polarização de membrana (A) e Polarização de eletrodo (B)



Fonte: Kearey *et al*, 2002.

6.2 ANÁLISE GEOTÉCNICA – ESTRUTURAL

A análise estrutural consiste no mapeamento de estruturas de fraqueza de origem natural denominadas descontinuidades e encontradas no maciço rochoso (Di Giorgio *et al*, 2003). Essas descontinuidades podem ser classificadas como acamamentos, fraturas, falhas, juntas e apesar de serem formadas por diferentes processos geológicos apresentam como característica comum a possibilidade de conduzir fluidos e, conseqüentemente diminuição da sua resistência perante ao material do entorno (Priest, 1983).

O entendimento dos padrões de fraturamento em um maciço é de fundamental importância para assegurar sua estabilidade (Hudson e Priest, 1983). Os principais problemas geológicos e geotécnicos de um maciço são caracterizados pelos padrões geométricos das descontinuidades que envolvem sua orientação, alteração, abertura, persistência, preenchimento, rugosidade, espaçamento e presença de água.

O parâmetro orientação é descrito pela direção da descontinuidade no maciço que é medida no sentido horário com relação ao norte verdadeiro e o mergulho desta frente ao maciço. Tanto a direção quanto o mergulho são suficientes para informar a orientação da descontinuidade no espaço e são determinadas através da bússola geológica. Essas medições resultam em diagramas de rosetas ou em projeções

estereográficas que indicam as principais famílias de descontinuidades e auxiliam na análise cinemática, com vista a identificar possíveis planos de rupturas (Aranha *et al*, 2005; Carmignani e Fiori, 2009).

O espaçamento corresponde a distância entre as descontinuidades e é medido por uma linha de varredura na face de um talude (*scanline*), quanto menor o espaçamento, mais fraturado é o maciço. A persistência por sua vez está atrelada a extensão da descontinuidade e pode ser estimada pelo comprimento dos traços visíveis nas faces dos taludes. Descontinuidades mais extensas devem ter um estudo mais aprofundado, pois muitas vezes apresentam comprimento ainda maior para o interior do maciço e podem ser determinantes em planos de ruptura (Carmignani e Fiori, 2009).

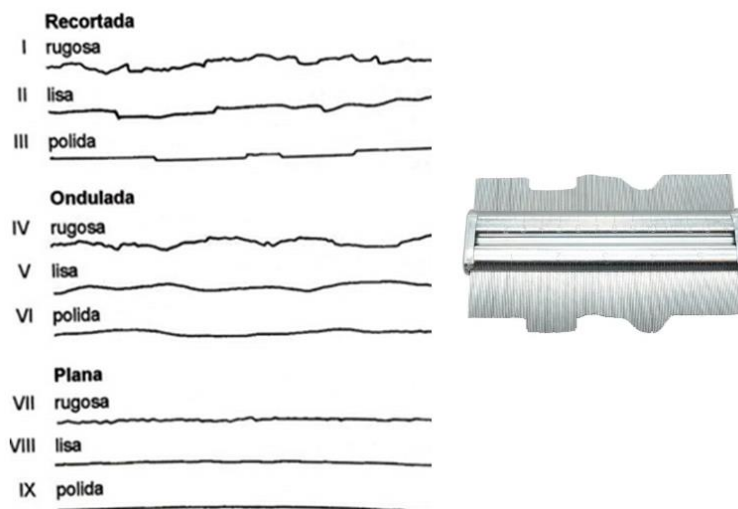
As descontinuidades podem ser fechadas ou abertas, representada neste caso pela dimensão de abertura, que podem apresentar rugosidade, alteração ou algum tipo de preenchimento.

A rugosidade indica a irregularidade da parede da descontinuidade e é analisada com base no parâmetro *Jr* (*joint roughness number*) presente no Índice Q de caracterização de maciços rochosos proposto por Barton (1973). O parâmetro *Jr* pode ser estimado através da comparação visual da superfície, por meio do perfilômetro (pente de Barton), com os perfis típicos de rugosidade (Figura 41). A Tabela 10 indica os valores de *Jr* a serem atribuídos a partir da correlação destes perfis.

Além do parâmetro *Jr*, é possível inferior o parâmetro JRC (Coeficiente de Rugosidade das Juntas) ao correlacionar as medidas visuais com os dez perfis de rugosidade estabelecidos por Barton e Choubey (1977) (Figura 42).

As paredes das descontinuidades quando expostas ao ambiente ficam suscetíveis ao processo de intemperismo que causam diferentes graus de alteração intempérica e alteram sua resistência. A alteração da parede da descontinuidade pode ser quantificada através do parâmetro *Ja* (*Joint alteration number*) também presente no Índice Q de caracterização de maciços rochosos proposto por Barton (1973) (Tabela 11).

Figura 41: Perfis típicos de Rugosidade e Pente de Barton utilizado nas medições



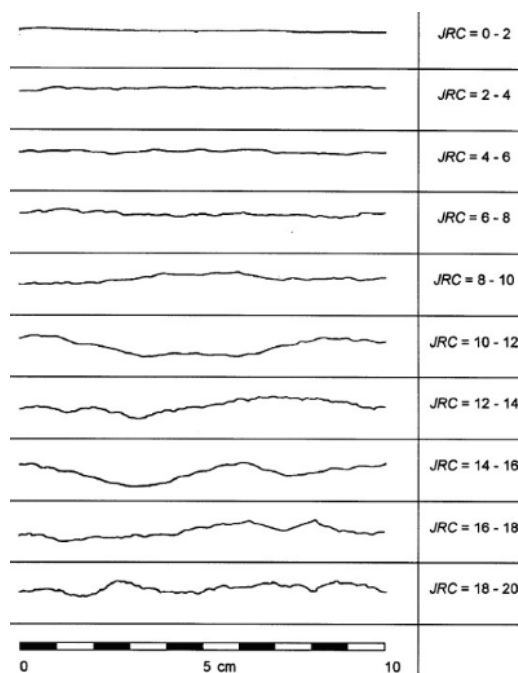
Fonte: Adaptado de Barton (1973).

Tabela 10: Valores de Jr

Valor atribuído a rugosidade das juntas para contato parede da descontinuidade-rocha;	
Característica	Jr
Juntas descontínuas, recortadas	4
Rugosa ondulada	3
Lisa ondulada	2
Polida ondulada	1,5
Rugosa planar	1,5
Lisa planar	1,0
Polida planar	0,5

Fonte: Adaptado de Barton (1973).

Figura 42: Relação entre perfis de rugosidade e JRC



Fonte: Adaptado de Barton e Choubey (1977)

Tabela 11: Valores de Já

Número referente as zonas de alteração no contato parede de descontinuidade-rocha	
Característica	Ja
Rígida com preenchimento impermeável (ex quartzo ou epídoto)	0,75
Paredes inalteradas com coloração de alteração apenas nas superfícies	1,0
Paredes ligeiramente alteradas com de areia e rocha desintegrada, porém sem argila	2,0
Paredes revestidas com silte ou areia argilosa de textura não mole	3,0
Paredes revestidas com minerais de argila de baixa fricção ou argilas expansivas	4,0

Fonte: Adaptado de Barton e Bar (2015)

A abertura das descontinuidades caracterizada pela distância entre as paredes das rochas adjacentes pode ser classificada de acordo com seu tamanho (Tabela 12).

Tabela 12: Classificação das aberturas das descontinuidades

Abertura	Descrição	Classificação
<0,1 mm	Muito apertada	Descontinuidades fechadas
0,1-0,25 mm	Apertada	
0,25-0,5 mm	Parcialmente aberta	
0,5-2,5 mm	Aberta	Descontinuidades com lacunas
2,5-10 mm	Vão moderado	
>10 mm	Vão	

1-10 cm	Vão grande	Descontinuidades abertas
10-100 cm	Vão extremamente grande	
>1 m	Caverna	

Fonte: Adaptado de ISRM (1981)

A percolação ou presença de água em descontinuidades pode ser um condicionante a ruptura. Essas descontinuidades podem ser preenchidas ou não e nesses casos são classificadas através de inspeções visuais descritas na Tabela 13.

Tabela 13: Classificação do fluxo de água nas descontinuidades

Descontinuidades não preenchidas	
Classificação	Descrição
I	A descontinuidade é muito apertada e seca, não apresenta fluxo de água
II	A descontinuidade é seca sem evidências de fluxo de água
III	A descontinuidade é seca, porém mostra evidências de percolação
IV	A descontinuidade é úmida, mas não há presença de água
V	A descontinuidade apresenta infiltração no formato de gotejamento, mas não há fluxo contínuo
VI	A descontinuidade apresenta fluxo contínuo de água (l/min)
Descontinuidades preenchidas	
Classificação	Descrição
I	Os materiais de preenchimento estão secos e consolidados
II	Os materiais de preenchimento estão úmidos, mas não há presença de água
III	Os materiais de preenchimento estão molhados e há gotejamento ocasional
IV	Presença de fluxo de água contínuo (l/min) e alguns materiais de preenchimento estão molhados
V	Os materiais de preenchimento estão molhados localmente e há fluxo de água (l/min)
VI	Os materiais de preenchimento estão totalmente molhados e o fluxo de água apresenta alta vazão

Fonte: Adaptado de ISRM (1981)

O material de preenchimento é aquele que ocupa descontinuidade e influencia diretamente na sua resistência ao cisalhamento, permeabilidade e deformabilidade. Os principais materiais de preenchimento são areias, argilas, siltes, óxidos de ferro e muitas vezes água. Os enchimentos argilosos aliados a presença de água favorecem a ocorrência de deslizamentos entre blocos de rochas (Carmignani e Fiori, 2009).

Por fim, o parâmetro relacionado a resistência do maciço pode ser obtido através do ensaio de compressão uniaxial em laboratório. No entanto, muitas vezes é desejado a obtenção da classificação do maciço de uma maneira mais ágil e menos dispendiosa. A Tabela 14 indica correlações de valores de resistência obtidos em campo.

Tabela 14: Classificação da resistência de solo (S1-S6) e rocha (R6-R0) em campo

Nomenclatura	Descrição	Identificação em campo	Resistência aproximada (MPa)
S1	Argila muito mole	Facilmente penetrada pelo punho	<0,025
S2	Argila mole	Facilmente penetrada com o polegar	0,025-0,05
S3	Argila firme	Pode ser penetrada realizando certa força com o polegar	0,05-0,1
S4	Argila rígida	Penetrada apenas com grande esforço pelo polegar	0,1-0,25
S5	Argila muito rígida	Possível criar marcações com a unha, porém não penetrável	0,25-0,5
S6	Argila dura	Marcada com muita dificuldade pelas unhas	>0,5
R6	Rocha extremamente forte	O martelo geológico só consegue lascas a rocha	>250
R5	Rocha muito forte	O martelo geológico necessita de muitos golpes para fraturar a rocha	100-250
R4	Rocha forte	O martelo geológico necessita de mais de um golpe para fraturar a rocha	50-100
R3	Rocha medianamente fraca	Uma faca de bolso não consegue raspar a rocha, porém um único golpe com o martelo geológico é capaz de fraturar	25-50
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada com uma faca de bolso	5-25
R1	Rocha muito fraca	A rocha desintegra com golpes firmes do martelo geológico	1-5
R0	Rocha extremamente fraca	Cortada pelo apertar das mãos	0,25-1

Fonte: Adaptado de ISRM (1981)

6.3 ANÁLISE CINEMÁTICA

As análises cinemáticas são realizadas com o intuito de avaliar o potencial de ruptura de taludes de rocha. Para isso, além do conhecimento dos parâmetros acima citados, é necessário estimar o ângulo de atrito de pico das paredes das descontinuidades. O ângulo de atrito de pico (ϕ_{pico}) pode ser estimado através da correlação entre alteração química (J_a) e rugosidade (J_r) das paredes das descontinuidades (Tabela 15).

Tabela 15: Estimativa do ângulo de atrito de pico

Contato parede descontinuidade- rocha	<i>Jr</i>	<i>Ja=0,75</i>	<i>Ja=1,0</i>	<i>Ja=2</i>	<i>Ja=3</i>	<i>Ja=4</i>
Juntas descontínuas, recortadas	4	79°	76°	63°	53°	45°
Rugosa ondulada	3	76°	72°	56°	45°	37°
Lisa ondulada	2	69°	63°	45°	34°	27°
Polida ondulada	1,5	63°	56°	37°	27°	21°
Rugosa planar	1,5	63°	56°	37°	27°	21°
Lisa planar	1,0	53°	45°	27°	18°	14°
Polida planar	0,5	34°	27°	14°	9,5°	7,1°

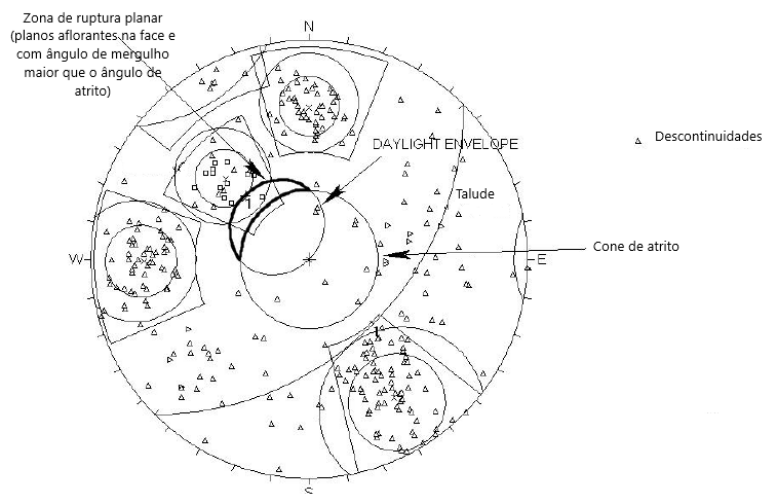
Fonte: Adaptado de Addis, Barton e Bandis (1990)

Na análise da ruptura planar são consideradas as seguintes condições:

- Ângulo entre a direção dos planos de fratura e a direção do talude menor ou igual a 20°;
- plano de fratura deve aflorar na superfície livre do talude;
- mergulho do plano da fratura deve ser maior que o ângulo de atrito;
- plano potencial de ruptura deve interceptar a porção superior do talude, terminar em uma fenda de tração ou ser limitado por estruturas que permitam a liberação dos blocos.

Para a análise cinemática são representadas essas condições e para isso são importadas as medidas de mergulho e direção de mergulho das descontinuidades mapeadas (dip/dip direction), implementadas restrições laterais de +/- 20°, representação da direção do talude, criação do *daylight envelope*, que representa a região que irá conter os pólos dos planos que afloram na face livre do talude e, por fim, criação do cone de atrito, representado pelo valor do ângulo de atrito da descontinuidade do maciço, estimado pela correlação indicada na Tabela 15. A Figura 43 representa um overlay para identificação de ocorrência de ruptura planar.

Figura 43: Esquemática da ocorrência da ruptura planar



Fonte: Adaptado de Dips User's Guide

Na análise da ruptura em cunha são consideradas as seguintes condições:

- Linha de intersecção de dois planos deve aflorar na superfície livre do talude;
- mergulho da linha de intersecção dos planos deve ser menor que o mergulho da face do talude e maior que o ângulo de atrito.

Para isso, são inseridas as medidas de mergulho e direção de mergulho das descontinuidades mapeadas (dip/dip direction), projetados os planos das principais famílias de descontinuidades existentes, verificadas as intersecções entre esses planos, representado a direção do talude e criado o cone de atrito com base no ângulo de atrito estimado e contabilizado a partir da borda do estereograma (Figura 44).

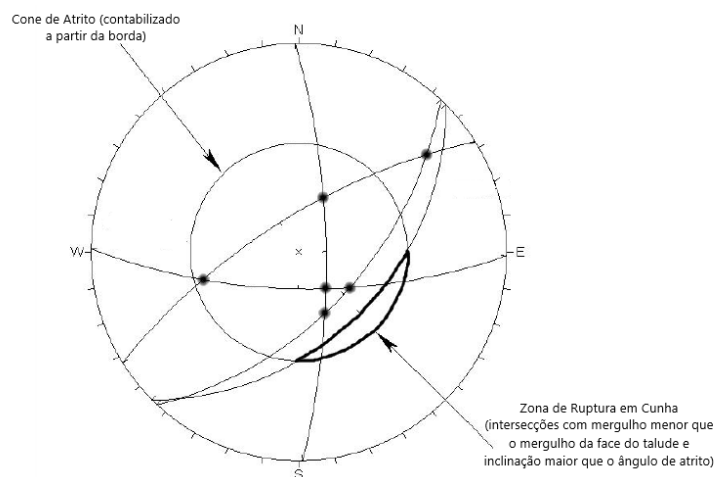
Na análise da ruptura por tombamento direto são consideradas as seguintes condições:

- Presença de duas famílias cruzadas e mergulho para dentro do talude;
- Presença de família de fratura de baixo ângulo e de mergulho preferencial para fora do talude;
- Restrições laterais definidas com relação ao rumo do mergulho da face do talude (menor que $\pm 10^\circ$)

Para essa análise são importadas as medidas de mergulho e direção de mergulho das descontinuidades mapeadas (dip/dip direction), implementadas restrições laterais de $\pm 10^\circ$, representação da direção do talude, criação do cone de

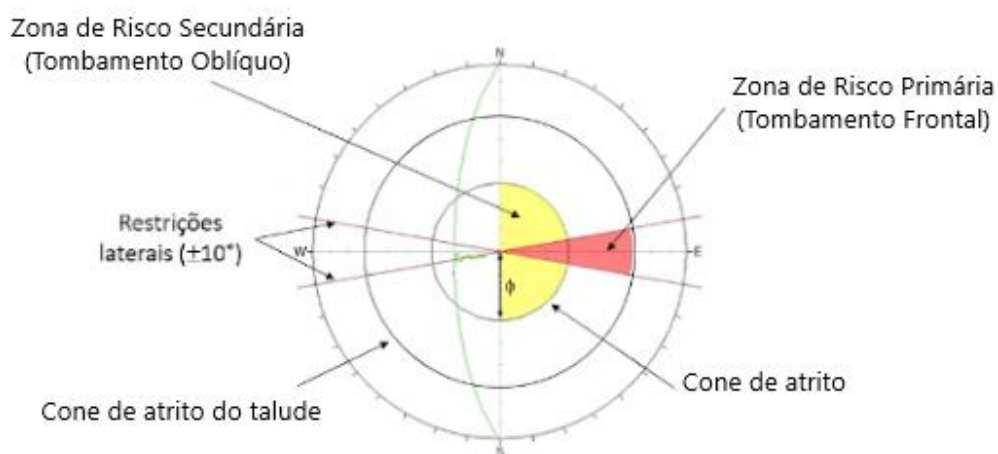
atrito referente ao ângulo de atrito da descontinuidade e criação do cone de atrito referente ao talude, indicado pelo valor do ângulo de inclinação do talude representado a partir da borda do estereograma. A Figura 45 representa um overlay para identificação de ocorrência de ruptura por tombamento direto.

Figura 44: Esquematisação da ocorrência da ruptura em cunha



Fonte: Adaptado de Dips User's Guide

Figura 45: Esquematisação da ocorrência da ruptura por tombamento



Fonte: elaborado pelo autor

7 AQUISIÇÃO DE DADOS

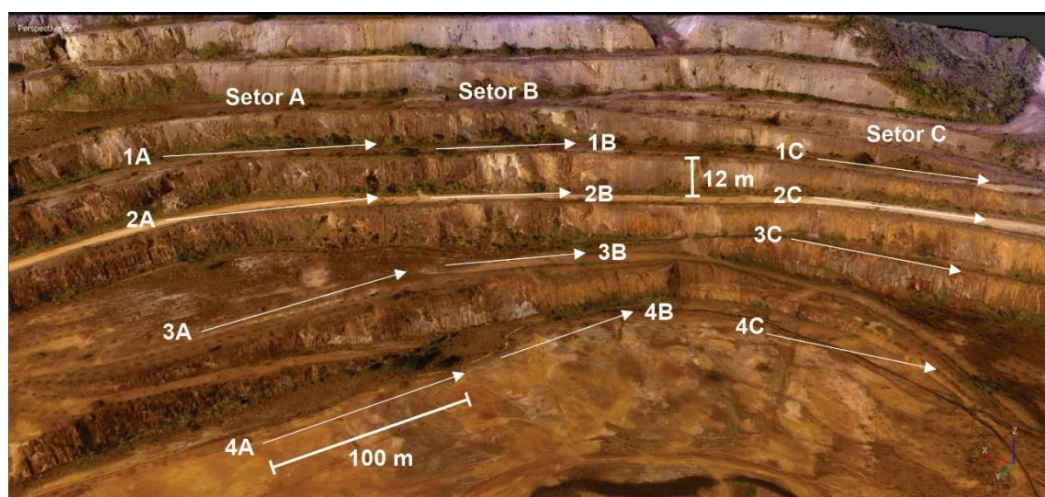
7.1 DADOS GEOFÍSICOS

Após visita de reconhecimento da área, a frente SE foi escolhida para estudo e análise visto que apresenta heterogeneidade no maciço: setores com e sem rupturas, com e sem presença de água.

Os trabalhos de campo para a aquisição geofísica e análise geotécnica-estrutural ocorreram durante os meses de dezembro de 2021 a fevereiro de 2022 e novembro e dezembro de 2022, em períodos de intervalo entre as chuvas com a finalidade de interceptar zonas de fluxo de água no maciço, sem comprometer a eficácia dos métodos utilizados.

Os ensaios geofísicos de eletrorresistividade, polarização induzida e GPR foram realizados em 3 diferentes setores, em 4 níveis de bancadas diferentes, pertencentes a frente SE da cava da mina (Figura 46). As linhas foram realizadas no sentido SW em 4 diferentes bermas de cada setor, com comprimento total de 100m e eletrodos espaçados a cada 5m. O caminho percorrido e mapeado pelo GPR seguiu os 100 metros adotados pelos métodos de resistividade elétrica e de cargabilidade, com o objetivo de promover maior integração entre os resultados.

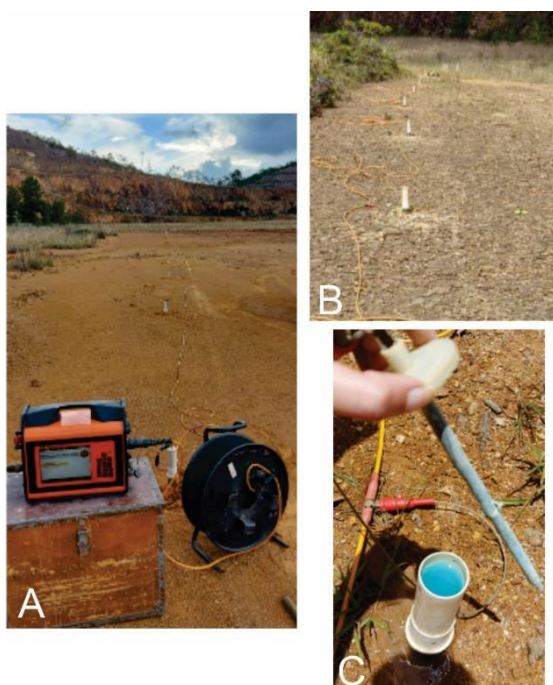
Figura 46: Aquisição Geofísica



Fonte: elaborado pelo autor

Os eletrodos utilizados foram do tipo cerâmica não polarizável com solução de sulfato de cobre e o equipamento utilizado em campo foi o Resistivímetro Terrameter LS da ABEM de origem sueca (Figura 47). Este equipamento possui potência de 250W, corrente máxima de 2,5 A, resolução de $1\mu\text{V}$ e permite aquisição de dados de maneira automática (ABEM, 2012). Os parâmetros de configuração para execução deste trabalho foram: corrente de 500 mA, tempo de transmissão de 1 segundo e tempo de leitura após o corte de corrente de 0,3 segundos.

Figura 47: Montagem das linhas geofísicas: A) Resistivímetro; B) Linha geofísica; C) Eletrodo não polarizável e solução de sulfato de cobre



Fonte: elaborado pelo autor

Após a aquisição dos dados de eletrorresistividade e cargabilidade estes foram previamente analisados estatisticamente para que os valores anômalos (negativos) fossem eliminados e os valores extremos comparados aos vizinhos minimizados. A técnica de tomografia elétrica (ERT) apresenta como resultados imagens 2D ou 3D referentes a distribuição da resistividade elétrica ao longo da subsuperfície. A análise e a interpretação dessas imagens possibilitam a distinção de diferentes litologias, bem como da existência de água (Perrone *et al.*, 2014). Para obter estas imagens foram utilizadas rotinas de inversão através de softwares, como por exemplo o Res2Dinv, que através do método dos mínimos quadrados e com correções topográficas para

geração de seções bidimensionais (Loke, 2004). Os dados foram processados no software Res2Dinv (2D) versão 3.53 (Geotomo Software) e com isso foram geradas representações por meio de modelos de resistividade e cargabilidade de subsuperfície. Esses modelos são apresentados no formato de seções bidimensionais que relacionam a distância e a profundidade e os valores quantitativos em escala gráfica logarítmica (Moreira *et al*, 2016).

O equipamento de GPR utilizado na execução deste trabalho foi o MALÅ Easy Locator WideRange com uma antena de alto alcance dinâmico de 450 MHz, utilizada para profundidade rasa (menos de 3 metros) e 80 MHz para maior profundidade, com informações exibidas em tempo real em uma tela acoplada (Figura 48). Através do equipamento, foi adotado um valor de velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas de 130 m/ μ s para todo o maciço rochoso, dada a sua pequena e restrita variedade litológica. Os resultados foram processados em nuvem no *software* MALÅ Vision, desenvolvido pelo próprio fabricante do equipamento GPR utilizado. Durante o processamento a constante dielétrica de valor igual a 5 foi selecionado, em referência aos granitos, rocha similar as predominantes na área de estudo.

Filtros básicos de processamento, como o AGC (controle automático de ganho) foram adotados para destacar os padrões de reflexão e refração das fraturas presentes, com o objetivo de melhorar a resolução de profundidade (Adepelumi *et al*, 2013). Os resultados obtidos consistiram em radargramas que relacionam distância do ponto inicial de investigação e profundidade de investigação, ambos em metros. Posteriormente, os radargramas foram interpretados e correlacionados com as descrições das faces do talude feitas durante a análise estrutural do maciço rochoso.

Figura 48: Equipamento GPR utilizado no ponto inicial de coleta de dados



Fonte: do autor

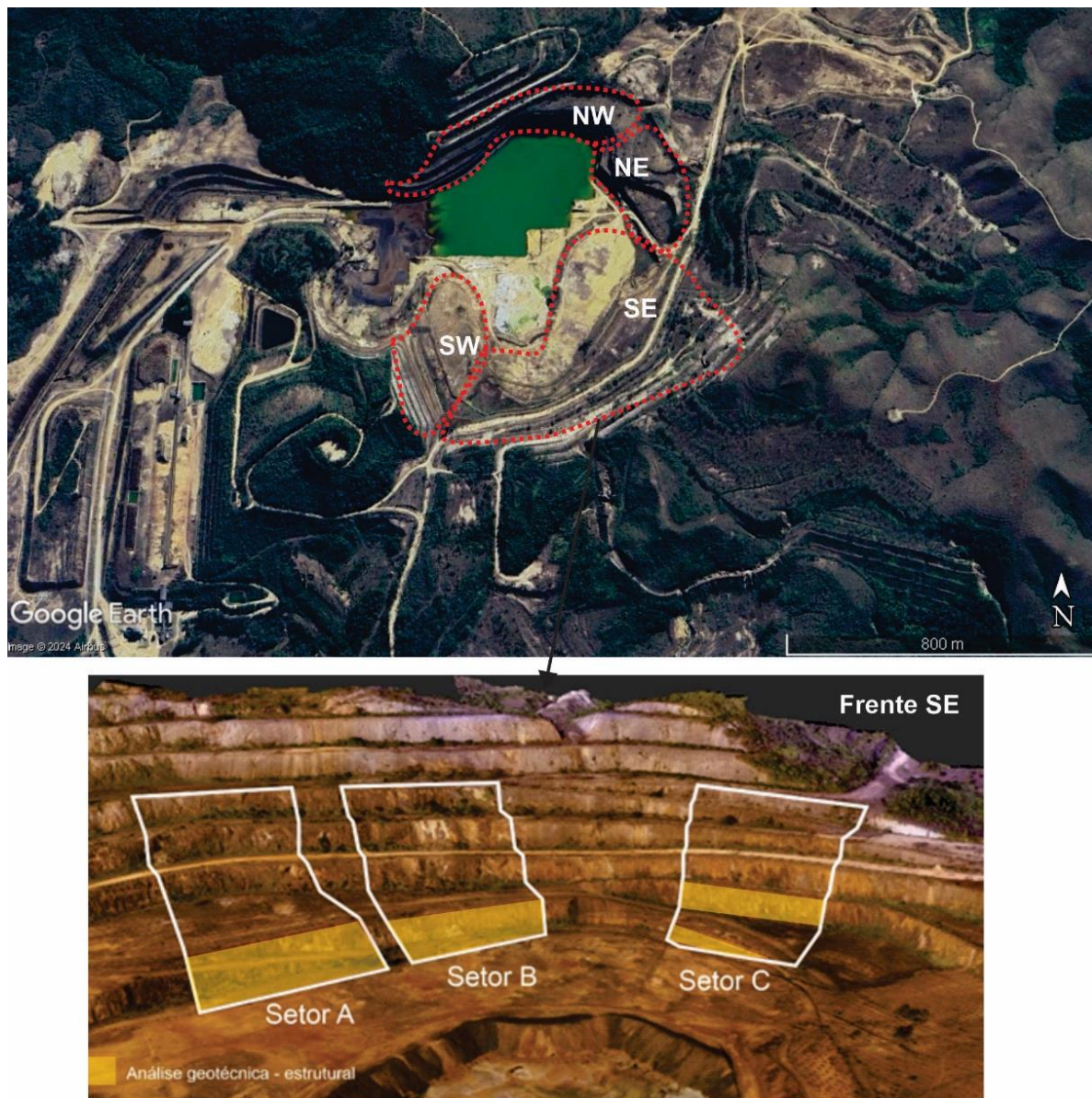
7.2 DADOS GEOTÉCNICO – ESTRUTURAIS

A análise geotécnica – estrutural ocorreu na face das bancadas localizadas entre as linhas 3 e 4 nos taludes inferiores dos Setores A, B e C, com comprimento de 100 metros, coincidentes espacialmente com a aquisição geofísica (Figura 49).

Inicialmente foram feitas demarcações a cada 10 metros ao longo da face do talude com o auxílio de tinta spray, barbante e fita métrica (Figura 50 A). Foram observadas e anotadas alterações litológicas da face como um todo e esboçados croquis (Figura 50 B e C). Pontos mais notáveis destacados nos croquis foram observados de maneira mais próxima a face do talude. Para cada descontinuidade foram obtidos dados referentes a sua atitude (dip/dipdir) com o auxílio da bússola Brunton (Figura 50 D) e de suas características referentes a alteração, rugosidade, abertura e presença de água, listadas anteriormente. Os dados estruturais foram posteriormente analisados e interpretados no *software Dips*, onde foram executadas as análises cinemáticas.

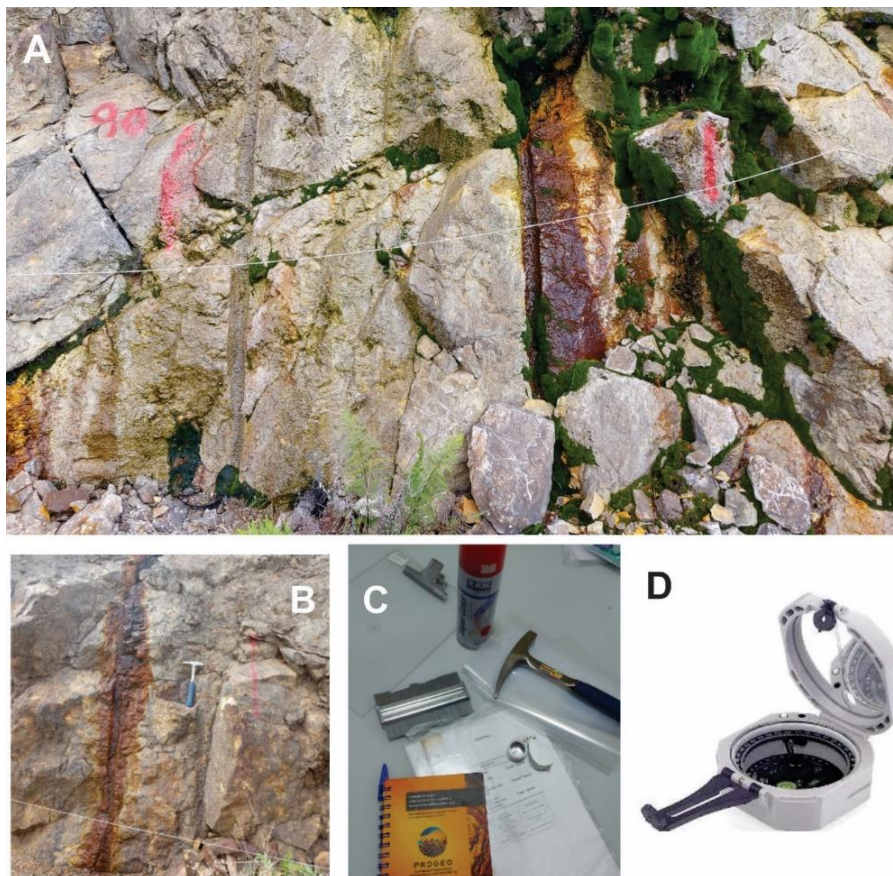
Foi realizado também voo de drone para auxiliar na captura de imagens, geração do modelo 3D e posterior análise do local. O drone utilizado foi o Phantom 4 Advanced com altura de voo igual a 100 metros e resolução de 3 cm/pixel. As 267 imagens adquiridas foram posteriormente tratadas no *software Agisoft Metashape*.

Figura 49: Vista superior da cava e frontal da Frente SE com delimitação dos setores estudados



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 50: Análise Geotécnica - Estrutural. A) Demarcação em face do talude; B) Observação de feições litológicas; C) Caderneta, tabelas, lupa, martelo e pente de barton utilizados; D) Bússola Brunton



Fonte: elaborado pelo autor

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

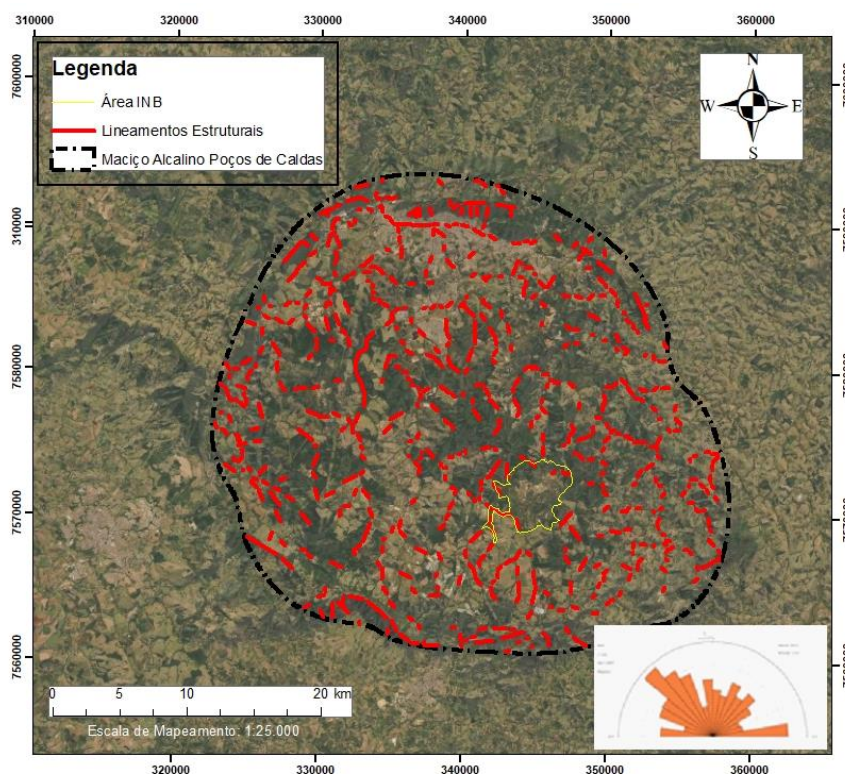
Conforme dito anteriormente, a Frente SE da cava da Mina Osamu Utsumi apresenta caráter heterogêneo com relação a distribuição das ocorrências de rupturas ao longo das bancadas, ou seja, a estabilidade é diferenciada em pontos específicos na cava. Essa heterogeneidade é observada em imagem área feita por drone e correlacionada com fotos obtidas nos trabalhos de campo. Com o objetivo de entender quais as variáveis estão relacionadas ao comportamento distinto do maciço frente a sua estabilidade, são apresentados nesse capítulo os resultados de cada método aplicado de maneira separada e por fim, uma análise integrada dos resultados é consolidada.

8.1 RESULTADOS GEOLÓGICOS, GEOTÉCNICOS E ESTRUTURAIS

8.1.1 Análise Regional e Frente SE

Os dados estruturais são utilizados tanto para o entendimento dos resultados geofísicos acerca da percolação de água no maciço, quanto para análises geotécnicas. De acordo com a interpretação de imagens de satélite, o Maciço Alcalino de Poços de Caldas (MAPC) apresenta predomínio de lineamentos estruturais na direção NW-SE (N355), seguido de estruturas na direção NE-SW (Figura 51).

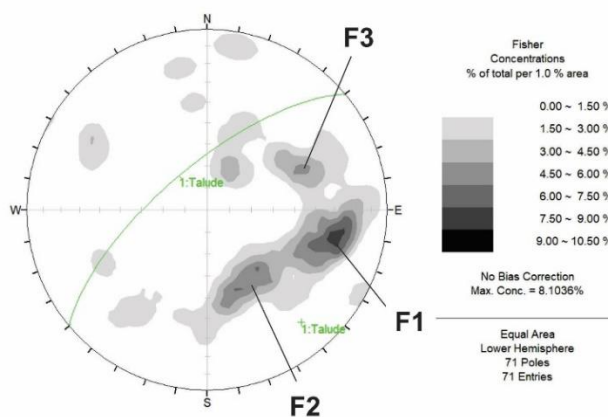
Figura 51: Lineamentos estruturais mapeados em escala 1:25.000 no MAPC



Fonte: elaborado pelo autor

Na Frente SE, foram mapeadas 71 medidas estruturais ao longo dos 3 setores pré definidos que indicaram a existência de três famílias principais (F1, F2 e F3) de estruturas com predominância na direção NW-SE, concordantes com os trabalhos feitos por Targa *et al*, 2019 (Figura 52).

Figura 52: Estereograma das medidas estruturais da frente SE (Setores A, B e C).



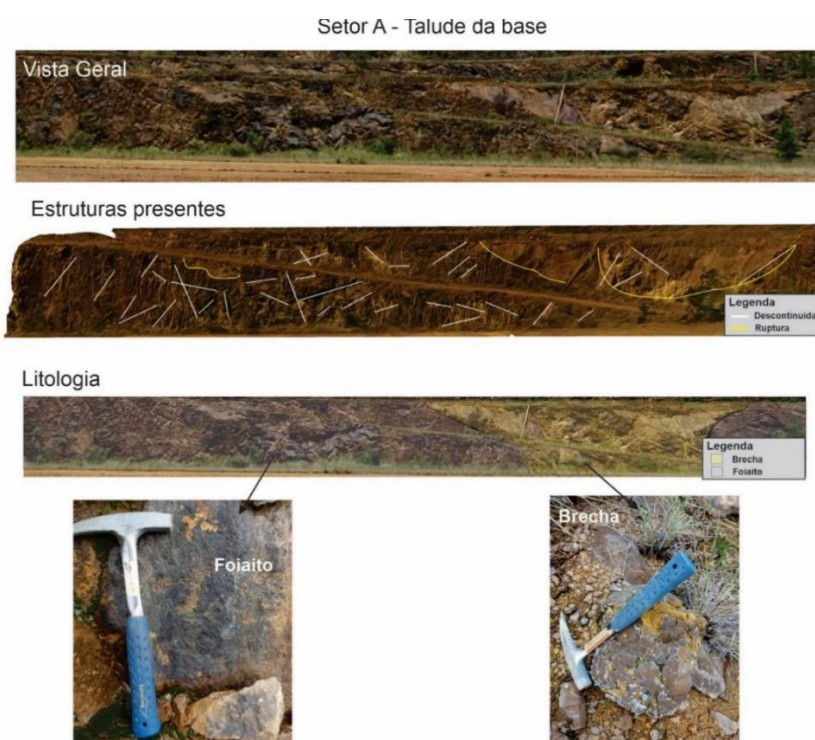
Fonte: elaborado pelo autor

8.1.2 Setor A

O Setor A é caracterizado pela ausência de percolação de água visível na face do talude e presença de duas litologias diferentes: foiaito nos primeiros metros e brecha vulcânica no restante, além da existência de duas grandes rupturas (Figura 53). Ambas litologias apresentam características de alteração, com película oxidada e o grau de alteração é intensificado em medida do avanço para brecha vulcânica.

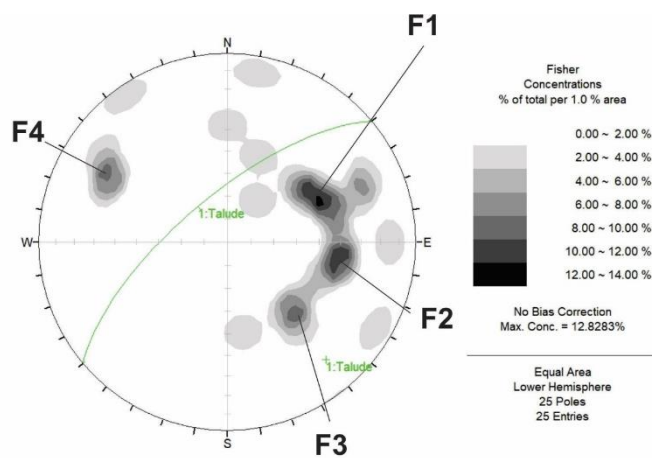
As 25 medidas estruturais (direção e mergulho) obtidas no Setor A e apresentadas na Tabela 16 permitiram a elaboração do estereograma que indicou a presença de 4 famílias principais (F1, F2, F3 e F4), com direção preferencial das fraturas em SW (Figura 54). Os pontos dispersos no estereograma podem indicar influência do desmonte na estruturação do maciço. A análise de densidade de fraturas por meio do Estimador Kernel e com base nas imagens realizadas, indicou a presença de média a alta densidade de fraturas por toda a face do maciço, exceto nas áreas onde ocorreram rupturas e não há mais como identificar planos de descontinuidades na face (Figura 55).

Figura 53: Litologia e estruturas presentes no Setor A



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 54: Estereograma referente ao Setor A



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 55: Densidade de Fraturas na face do Setor A



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 16: Características das discontinuidades mapeadas no Setor A

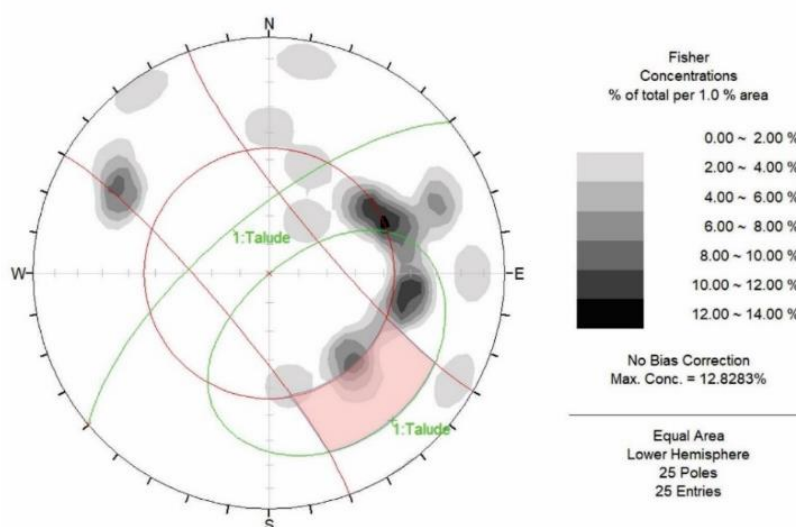
SETOR A												
ID	Estaca(m)	DIREÇÃO	MERGULHO	JRC	Jr	Ja	φ (°)	Abertura (mm)	Infiltração		Litotipo	Resistência
									U	F		
1	10	190	80	6	3	3	45	2	1		foiaito	R3
2	10	310	40	3	3	2	56	0,2	1		foiaito	R4
3	30	115	60	2	1,5	2	37	0,2	1		foiaito	R4
4	32	125	70	2	1,5	2	37	0,2	1		foiaito	R4
5	35	255	48	3	1,5	3	27	2	1		foiaito	R4
6	35	280	50	3	1,5	3	27	0,2	1		foiaito	R4
7	38	320	50	4	3	3	45	0,2	1		foiaito	R4
8	40	180	52	4	3	3	45	1	3		foiaito	R4
9	40	230	40	5	3	3	45	0,2	1		foiaito	R4
10	48	200	40	7	3	3	45	0,2	1		foiaito	R4
11	50	270	50	2	3	3	45	0,2	1		foiaito	R4
12	52	290	44	2	1,5	2	37	0,2	1		foiaito	R4
13	70	250	48	2	1,5	2	37	0,2	1		foiaito	R4
14	70	240	46	3	3	2	56	0,2	1		foiaito	R4
15	70	270	75	4	3	3	45	0,2	3		foiaito	R3
16	80	120	60	3	3	2	56	0,2	1		brecha	R3
17	82	280	52	4	3	3	45	0,2	1		brecha	R3
18	85	250	62	4	3	2	56	0,2	1		brecha	R3
19	90	240	40	6	3	3	45	2	1		brecha	R3
20	90	320	40	7	3	2	56	0,2	1		brecha	R3
21	98	350	40	5	3	3	45	0,2	1		foiaito	R3
22	98	145	84	5	2	3	34	0,2	1		foiaito	R3
23	100	245	70	7	3	4	37	2	5		foiaito	R3
24	100	300	80	5	3	2	56	2	1		foiaito	R3
25	100	215	22	3	1,5	2	37	2	5		foiaito	R3

Fonte: elaborado pelo autor

Os locais onde são encontradas as rupturas de maior expressividade são coincidentes com a brecha vulcânica que apresentou resistência R3 – (entre 25 a 50 MPa). Com relação a presença de água, as características verificadas na face do talude indicaram que 20 das discontinuidades mapeadas foram classificadas como secas e não apresentavam fluxo de água. O ângulo de atrito interno médio do maciço apresentou valores próximos a 44° e com ele, foi possível elaborar os estereogramas referentes as análises cinemáticas dos modos de ruptura planar, em cunha, e por tombamento (Figuras 56 a 58). Tais probabilidades de ocorrência acontecem quando os pólos de concentração de famílias de fraturas estão dentro da zona sombreada, e

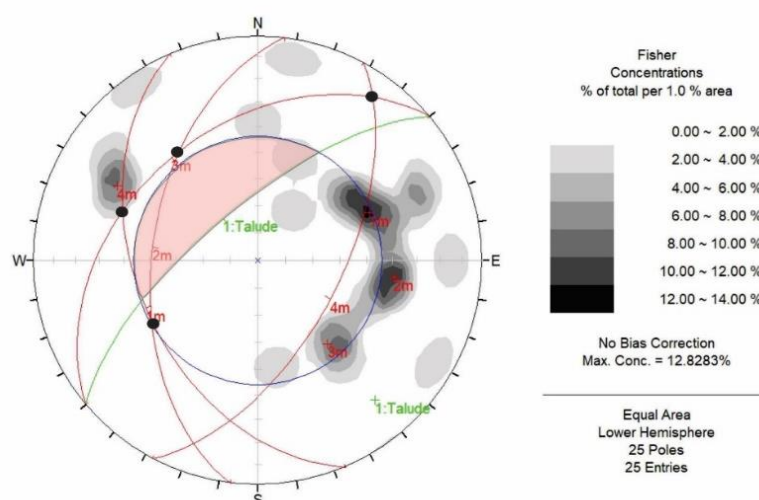
quando as rupturas em cunha e tombamento ocorrem na intersecção dos planos na zona sombreada.

Figura 56: Análise Cinemática Setor A – ruptura planar. O círculo vermelho representa o valor do ângulo de atrito da descontinuidade (44°); as linhas vermelhas os limiaries da ocorrência de ruptura e o polígono verde representa os planos que podem deslizar sobre a superfície livre do talude



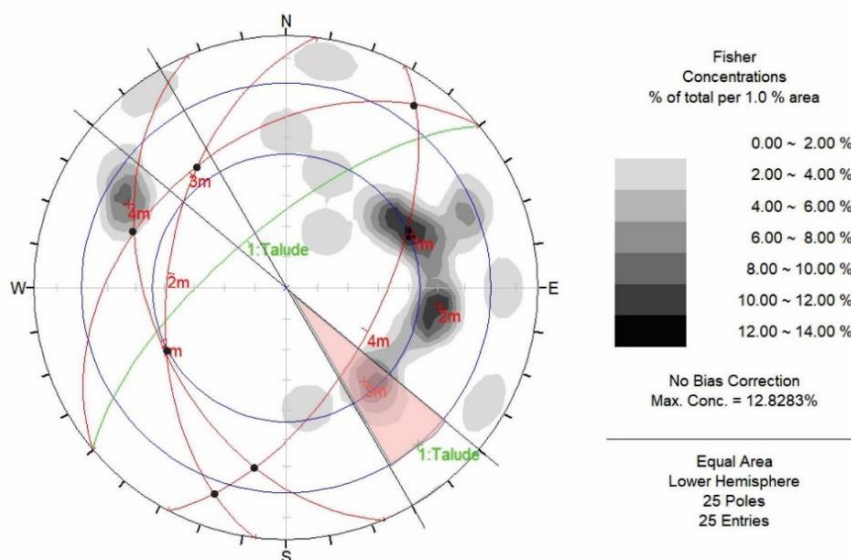
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 57: Análise Cinemática Setor A – ruptura em cunha. O círculo azul representa o cone de atrito das descontinuidades (valor do ângulo de atrito da descontinuidade contado a partir da borda estereograma). Os pontos pretos representam as intersecções das famílias de descontinuidades



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 58: Análise Cinemática Setor A – ruptura por tombamento. As linhas azuis representam as restrições laterais para ocorrência da ruptura ($< \pm 10^\circ$); os pontos pretos as intersecções de diferentes famílias de descontinuidades; o círculo azul interno representa o cone de atrito da descontinuidade (44°) e o externo representa o cone de atrito relacionado ao ângulo de inclinação do talude (70°).



Fonte: elaborado pelo autor

Dentre as 3 possibilidades de rupturas analisadas, existe probabilidade de ocorrer ruptura planar e risco marginal de ocorrer ruptura em cunha no Setor A. Não foram encontradas condições de ocorrência de ruptura por tombamento neste mesmo setor. Em campo, foi possível analisar e verificar que as rupturas existentes no talude inferior do Setor A são do tipo planar (Figura 59).

Figura 59: Rupturas do tipo planar visíveis na face do talude



Fonte: elaborado pelo autor

8.1.3 Setor B

O Setor B é caracterizado pela presença de grande ruptura no centro da seção, que abrange toda altura do talude, percolação de água pelas discontinuidades no formato de gotejamento e alterabilidade da rocha. Logo após o término da ruptura há ponto com fluxo constante de água (L/min), atrelado as condições de alta pluviosidade que ocorreram nos dias antecedentes aos trabalhos de campo. Além disso, é observada a diferença litológica na seção: presença de tinguaito fraturado e de brecha vulcânica com resquícios de mineralização (Figura 60).

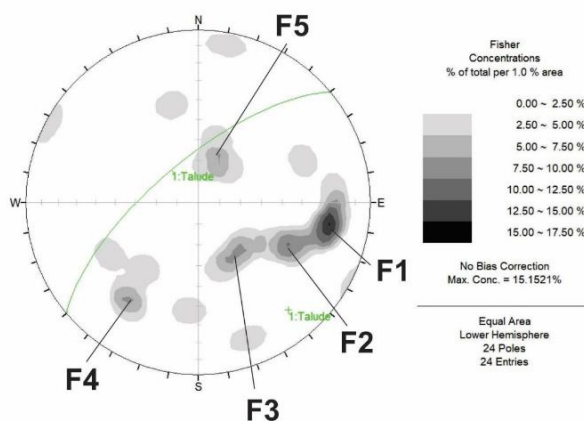
Com as 24 estruturas mapeadas foi possível a elaboração de um estereograma para o Setor B que indicou a presença de cinco famílias principais de discontinuidades, cuja principal direção é NW (Figura 61 e Tabela 17). A análise de densidade de fraturas por meio do Estimador Kernel e com base nas imagens realizadas, indicou a presença de zonas com média a alta densidade de fraturas por toda a face do maciço, exceto na ruptura principal, pois não há como identificar planos de discontinuidades na face (Figura 62).

Figura 60: Litologia e estruturas presentes no Setor B. Blocos soltos na ruptura principal, evidências de percolação de água ao fim do plano de ruptura e resquícios de mineralização



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 61: Estereograma referente ao Setor B



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 62: Densidade de Fraturas na face do Setor B



Fonte: elaborado pelo autor

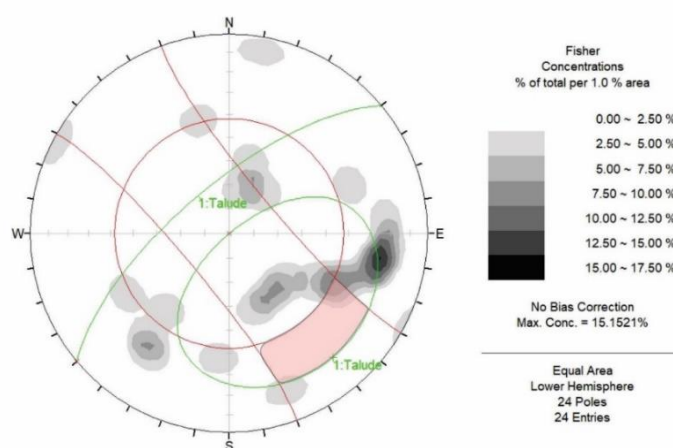
Tabela 17: Características das discontinuidades analisadas no Setor B

ID	Estaca(m)	DIREÇÃO	MERGULHO	JRC	Jr	Ja	ϕ (°)	Abertura (mm)	Infiltração		Litotipo	Resistência
									U	F		
1	2	248	55	6	1,5	2	37	1	5		tinguaito	R4
2	4	60	50	6	3	2	56	2	4		tinguaito	R4
3	6	275	70	4	3	2	56	2	4		tinguaito	R4
4	8	165	49	4	3	2	56	1	4		tinguaito	R4
5	12	325	30	7	3	2	56	1	4		tinguaito	R4
6	18	284	62	3	3	2	56	1	3		tinguaito	R4
7	22	190	82	5	3	3	45	1	2		brecha	R3
8	22	221	22	5	3	3	45	2	2		brecha	R3
9	26	281	67	5	3	3	45	1	2		brecha	R3
10	31	39	41	4	3	2	56	1	4		brecha	R3
11	41	196	31	3	3	3	45	1	2		brecha	R3
12	41	34	62	5	3	3	45	1	2		brecha	R3
13	41	299	41	3	3	3	45	2	2		brecha	R3
14	46	340	73	4	3	3	45	1	1		brecha	R3
15	50	118	88	5	3	3	45	1	4		brecha	R3
16	52	341	33	4	1,5	2	37	1	3		brecha	R3
17	55	194	18	4	3	3	45	1	3		brecha	R3
18	71	310	30	5	3	2	56	1	1		foiaito	R4
19	80	5	53	6	1,5	2	37	1	1		foiaito	R4
20	83	295	53	5	1,5	2	37	1	1		foiaito	R4
21	90	265	68	6	3	2	56	1	3		foiaito	R4
22	93	294	49	7	3	2	56	1	1		foiaito	R4
23	97	281	64	4	3	2	56	1	1		foiaito	R4
24	97	38	56	5	1,5	2	37	1	1		foiaito	R4

Fonte: elaborado pelo autor

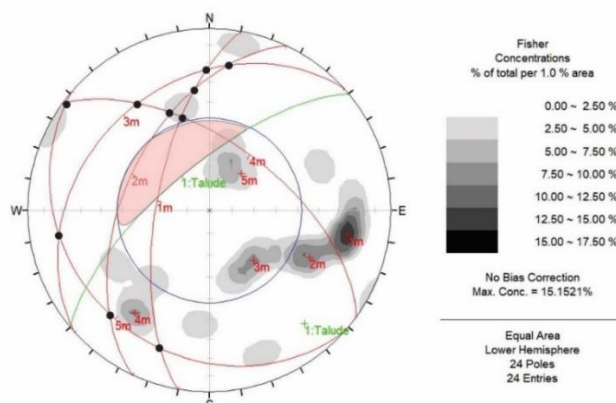
A zona brechada de baixa resistência (25 a 50 MPa) foi encontrada em campo entre 20 e 60 metros do Setor B e corresponde ao local onde houve a ruptura. Assim como no setor A, a alteração no maciço é verificada em toda a sua extensão, porém é acentuada em locais com indícios de percolação de água e na litologia brechada. O valor do ângulo de atrito interno médio encontrado para o maciço do Setor B foi 48° e permitiu a elaboração das análises cinemáticas (Figuras 63 a 65).

Figura 63: Análise Cinemática Setor B – ruptura planar. O círculo vermelho representa o valor do ângulo de atrito da descontinuidade (48°); as linhas vermelhas os limiares da ocorrência de ruptura e o polígono verde representa os planos que podem deslizar sobre a superfície livre do talude



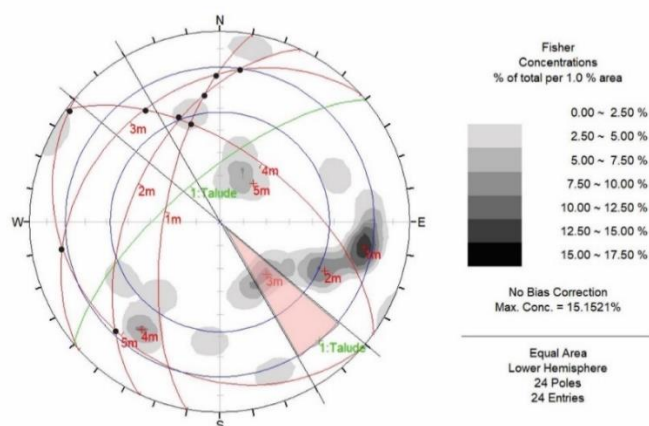
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 64: Análise Cinemática Setor B – ruptura em cunha. O círculo azul representa o cone de atrito (valor do ângulo de atrito da descontinuidade contado a partir da borda do estereograma). Os pontos pretos representam as intersecções das famílias de descontinuidades



Fonte: elaborado pelo autor

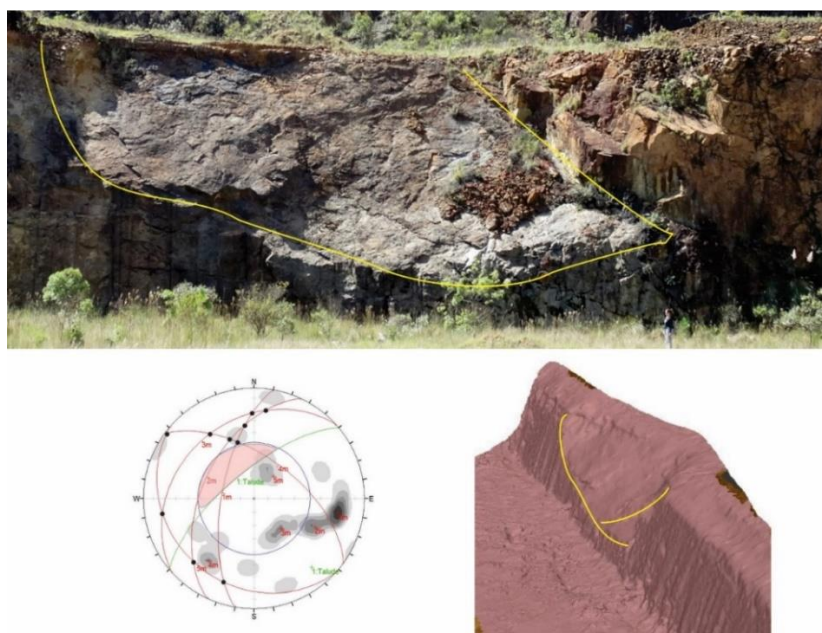
Figura 65: Análise Cinemática Setor B – ruptura por tombamento. As linhas azuis representam as restrições laterais para ocorrência da ruptura ($< \pm 10^\circ$); os pontos pretos as intersecções de diferentes famílias de descontinuidades; o círculo azul interno representa o cone de atrito (48°) e o externo representa o cone de atrito relacionado ao ângulo de inclinação do talude (70°).



Fonte: elaborado pelo autor

Não há indícios de ruptura por tombamento no Setor B, uma vez que não existe intersecção de famílias de descontinuidades na zona sombreada. Por outro lado, o risco de ocorrência de ruptura planar e em cunha existe e é verificado em campo (Figura 66).

Figura 66: Ruptura em cunha encontrada no talude inferior do Setor B



Fonte: elaborado pelo autor

8.1.4 Setor C

O Setor C é caracterizado pela integridade e menor grau de alteração do maciço, com raros pontos de deslocamentos notáveis. Há locais na face do talude onde são verificados indícios de umidade, dadas as condições de elevada pluviosidade nos dias que antecederam os trabalhos de campo. A litologia no setor C é composta por tinguaito e brecha vulcânica, visualizada na base do setor (coloração amarelada) (Figura 67).

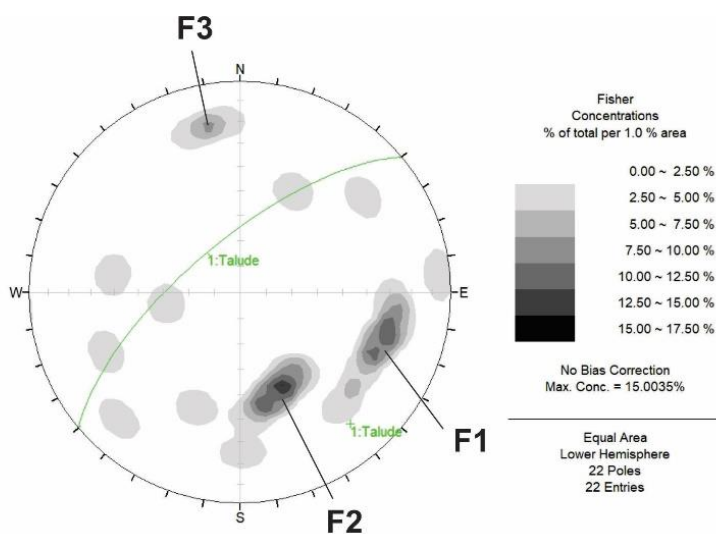
Figura 67: Frente SE – Setor C: demarcação de descontinuidades e litologias. Detalhe para a integridade do maciço com a conservação das marcas dos barriletes utilizados no desmonte e brecha vulcânica evidenciada na base do setor C: indícios de fluxo de água, oxidação e liberação de sulfetos com estruturas reliquias



Fonte: elaborado pelo autor

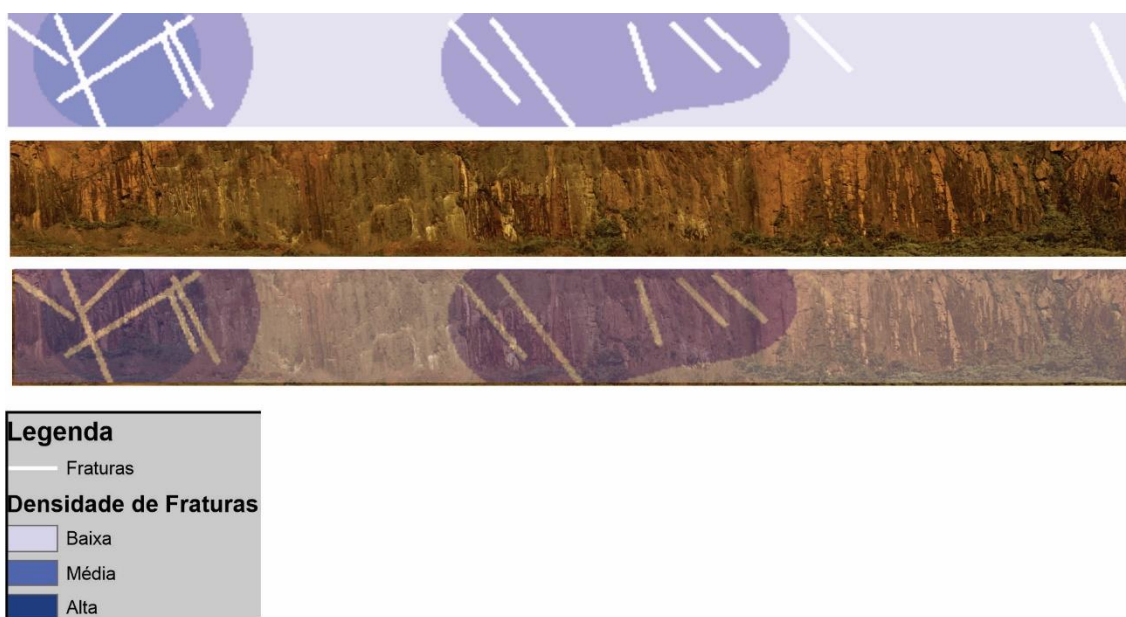
Foram mapeadas 22 descontinuidades no Setor C (Tabela 18), que apresentaram 3 famílias estruturais principais (Figura 68) e direção preferencial NW (N321). A análise de densidade de fraturas realizada por meio do Estimador Kernel e com base nas imagens, indicou a presença de baixa densidade de fraturamento ao longo da face do maciço, com núcleos de média a alta densidade (Figura 69).

Figura 68: Estereograma referente ao Setor C



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 69: Densidade de Fraturas na face do Setor C



Fonte: elaborado pelo autor

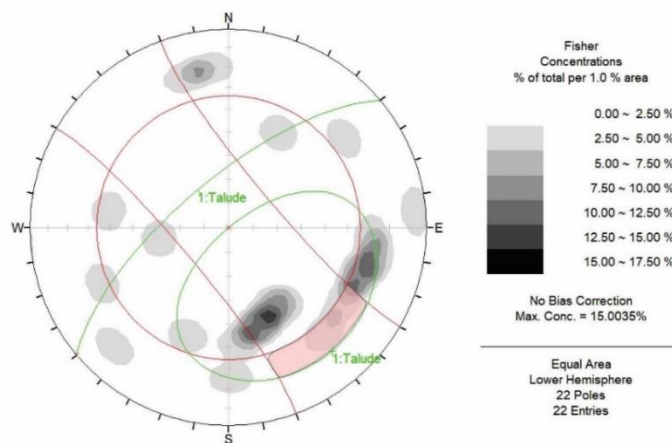
A maioria das descontinuidades analisadas apresentou valores de resistência acima de 50 MPa dentre a litologia predominante de tinguaito. O grau de alteração do maciço diferiu dos setores anteriores, uma vez que houve locais onde foi verificado a ausência de alteração nas paredes das descontinuidades. O ângulo de atrito interno médio das paredes das descontinuidades é próximo a 56° e permitiu a execução das análises cinemáticas para os diferentes tipos de rupturas (Figuras 70 a 72).

Tabela 18: Características das descontinuidades analisadas no Setor C

ID	Estaca (m)	DIREÇÃO	MERGULHO	JRC	Jr	Já	ϕ (°)	Abertura (mm)	Infiltração		Litotipo	Resistência
									U	F		
1	2	281	66	3	1,5	1	56	2	5		foiaito	R4
2	3	164	68	3	1,5	1	56	1	1		foiaito	R4
3	11	325	40	3	3	2	56	2	5		foiaito	R4
4	11	66	59	6	1,5	1	56	1	1		foiaito	R4
5	20	273	61	6	1,5	1	56	2	1		tinguaito	R4
6	20	331	37	7	1,5	1	56	1	1		tinguaito	R4
7	20	174	70	7	1,5	1	56	1	1		tinguaito	R4
8	28	342	43	6	3	2	56	2	4		tinguaito	R4
9	28	81	29	7	3	2	56	2	4		tinguaito	R4
10	31	265	84	4	3	2	56	2	4		tinguaito	R4
11	34	359	65	5	3	2	56	2	1		brecha	R3
12	44	290	58	3	3	2	56	1	1		tinguaito	R4
13	46	355	49	3	3	2	56	2	3		tinguaito	R4
14	52	289	61	3	1,5	2	37	2	5		tinguaito	R4
15	70	208	45	3	1,5	2	37	1	1		tinguaito	R4
16	81	303	58	4	3	1	72	3	5		tinguaito	R4
17	81	98	51	4	3	1	72	2	5		tinguaito	R4
18	86	344	43	4	3	2	56	1	1		tinguaito	R4
19	86	232	63	3	3	2	56	1	1		tinguaito	R4
20	95	21	49	3	1,5	2	37	1	1		foiaito	R4
21	99	318	61	3	3	2	56	2	5		foiaito	R4
22	99	44	72	3	3	1	72	2	5		foiaito	R4

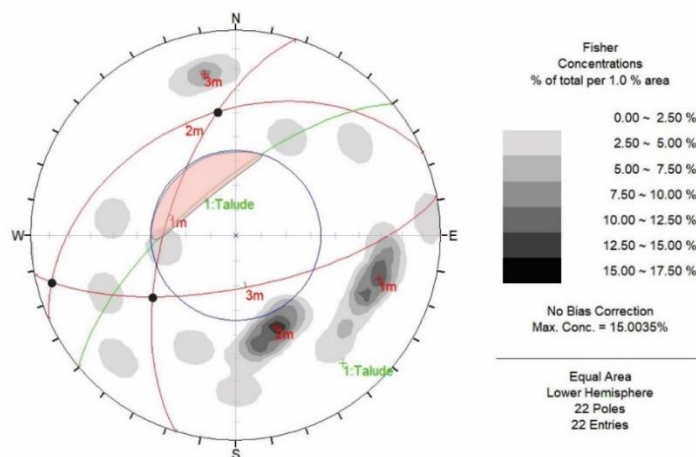
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 70: Análise Cinemática Setor C – ruptura planar. O círculo vermelho representa o valor do ângulo de atrito da descontinuidade (56°); as linhas vermelhas os limiares da ocorrência de ruptura e o polígono verde representa os planos que podem deslizar sobre a superfície livre do talude



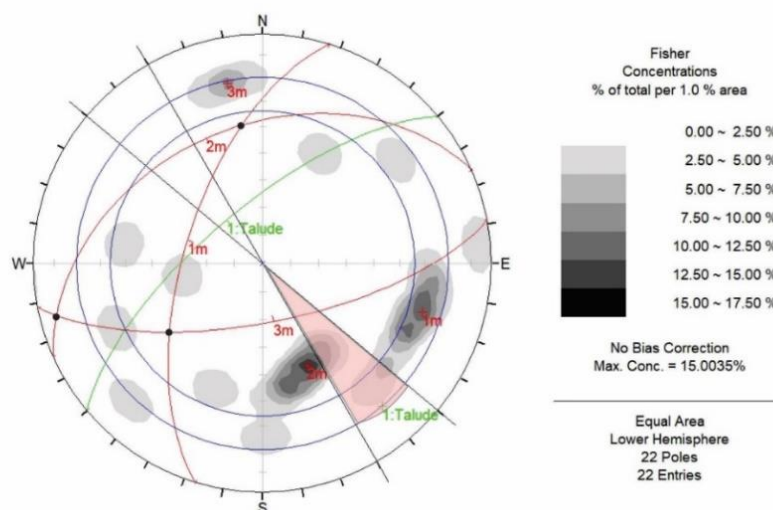
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 71: Análise Cinemática Setor C – ruptura em cunha. O círculo azul representa o cone de atrito (valor do ângulo de atrito da descontinuidade contado a partir da borda do estereograma). Os pontos pretos representam as intersecções das famílias de descontinuidades



Fonte: elaborado pelo autor

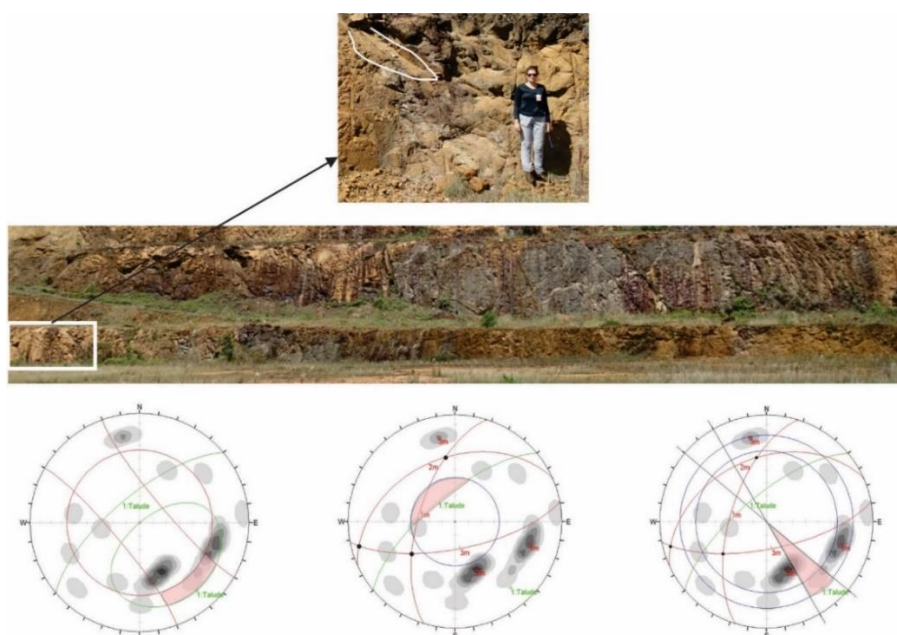
Figura 72: Análise Cinemática Setor C – ruptura por tombamento. As linhas azuis representam as restrições laterais para ocorrência da ruptura ($\pm 10^\circ$); os pontos pretos as intersecções de diferentes famílias de descontinuidades; o círculo azul interno representa o cone de atrito (56°) e o externo representa o cone de atrito relacionado ao ângulo de inclinação do talude (70°).



Fonte: elaborado pelo autor

Diferente dos setores anteriores, o Setor C apresentou probabilidade de ocorrência apenas da ruptura planar, em local de brecha vulcânica (Figura 73).

Figura 73: Talude Setor C com destaque para a ruptura na parte inferior em brecha



Fonte: elaborado pelo autor

8.2 RESULTADOS HIDROQUÍMICOS

Os resultados hidroquímicos foram fornecidos pela INB que realiza análises de cátions, ânions, metais e pH presentes em amostras de água coletadas nos poços de monitoramento localizados na cava da mina (Figura 74). Os dados apresentados são referentes a campanha de coleta realizada em 2015 pela INB, que embora defasados, são as últimas análises realizadas (Tabelas 19 e 20).

Figura 74: Localização dos poços de monitoramento na cava da mina



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 19: Características dos poços da cava e de suas amostras analisadas

Poço	Cota de Topo (m)	Cota de fundo (m)	pH
16	1366	1360	1,67
30	1366	1342	4,91
39	1335	1323	4,07
40	1334	1286	5,4
33	1337	1319	2,9
34	1333	1321	4,51
35	1349	1343	3,77
19	1383	1359	5,35

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 20: Parâmetros químicos das amostras dos poços da cava

Poço	Concentrações (mg/L)					
	K	Fe	Mn	HCO ₃	SO ₄	NO ₃
16	4,9	0,1	0,5	0,7	20,7	0,7
30	7,9	0,1	1,2	0	38,1	2,3
39	11,9	22,5	19,6	0	245,7	0,1
40	60,7	21,2	20,3	1,8	474,7	0,1
33	66	890	160,8	0	8424	0,8
34	66	0,5	11,7	0	130,8	1,1
35	9,7	0,1	0,1	0	58,2	0,2
19	10,7	0	0,1	0,4	0	5,8

Fonte: elaborado pelo autor

Todos os 8 poços analisados apresentam pH ácido (<7), fator indicativo da presença de drenagem ácida advinda provavelmente do fluxo de água que percola as rochas dos taludes. De acordo com a resolução CONAMA nº357/2005 (Conselho Nacional do Meio Ambiente) o pH de águas caracterizadas como doces devem ser entre 6 e 9, independentemente da sua classificação e uso (Brasil, 2005). Além disso, as águas subterrâneas em geral apresentam valor médio entre 1 a 5 mg/L de potássio e conforme analisado, demonstra o processo de lixiviação dos minerais do maciço da cava da mina, uma vez que 7 dos 8 poços presentes na frente SE possuem concentração de potássio acima de 5 mg/L (Vaitsman, 2005). Os sulfatos identificados nos poços 40 e 33, estão em desconformidade com a legislação que estabelece valores máximos de 250 mg/L e dentro da média das concentrações encontradas em águas naturais (entre 2 a 80 mg/L).

Os resultados químicos advindos da análise das águas presentes nos poços de monitoramento puderam ser correlacionados aos resultados geofísicos mostrados

a seguir. Os sulfetos disseminados pelo maciço em contato com água, geram efluentes de alta salinidade e baixo pH, detectados como anomalias de baixa resistividade (Casagrande e Moreira, 2021).

8.3 RESULTADOS GEOFÍSICOS

8.3.1 GPR

A interpretação dos radargramas obtidos para cada talude consistiu na análise de elementos interpretativos são baseadas nas respostas do maciço rochoso frente a transmissão de ondas eletromagnéticas. Zonas onde foram observados venetos de reflexão da onda, foram identificadas como presença de fraturas. Zonas com atenuação total do sinal foram identificadas como presença de água, ou seja, aquífero fraturado. Trabalhos semelhantes sobre o reconhecimento de aquíferos fraturados com base na atenuação de ondas eletromagnéticas foram apresentados por Silva *et al*, 2004 e Moutinho *et al*, 2005. A resolução da técnica depende do grau de saturação do maciço rochoso e neste caso a profundidade máxima de investigação foi de 10 metros.

É possível observar que todos os radargramas apresentados a seguir possuem uma camada horizontal superficial, com menos de 1 metro de profundidade, com atenuação total do sinal. Isso pode estar associado à presença de uma camada descontínua à frente do restante do maciço rochoso relacionada a juntas de alívio oriundas do desmonte do maciço rochoso quando a mina estava em operação. Aliado a isso, os eventos pluviométricos registrados nos dias anteriores ao trabalho de campo, podem ter criado uma saturação do material saprolítico de superfície.

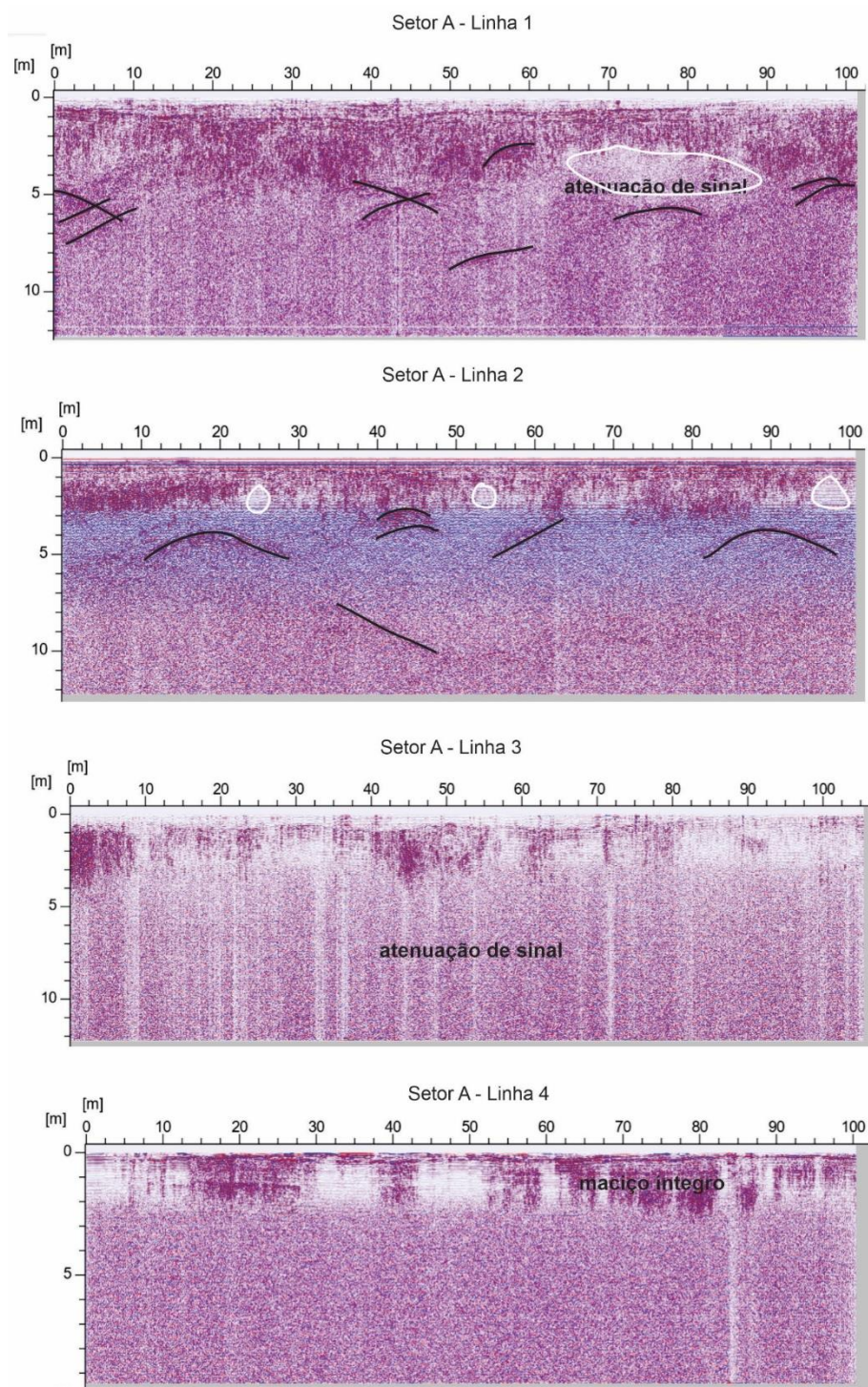
Essa atenuação do sinal é notória nas linhas de investigação 3 e 4 A, onde desde os primeiros metros de profundidade não é possível identificar estruturas descontínuas como as fraturas. A identificação de fraturas nas linhas 1 e 2 A pode ser indicativo de que mesmo com a presença de água no maciço, esta não apresenta fluxo, logo, a atenuação do sinal eletromagnético só ocorre nestas zonas de acúmulo

de água, com passagem das ondas para o restante do maciço. Desse modo, os taludes mais inferiores do Setor A estariam mais saturados que os demais e indicam conectividade das fraturas com geração de fluxo de água (Figura 75).

A extensão longa e contínua de atenuação de sinal eletromagnético registrado no radargrama da Linha 3 do Setor B indica a presença de água por pelo menos 3 metros de profundidade e 60 metros de extensão e induz a ocorrência de aquífero fraturado no maciço. A conectividade destas fraturas alcança o talude imediatamente inferior (Linha 4 – Setor B), onde é possível observar a continuidade da atenuação do sinal entre 50 a 70 metros, porém a poucos metros de profundidade. A coloração mais escura presente no radargrama e em volta deste núcleo de atenuação de sinal em 4B condiz com as características refletoras da rocha íntegra, ou seja, sem fraturas, que de fato não são observadas em padrões refletivos do radargrama (Figura 76).

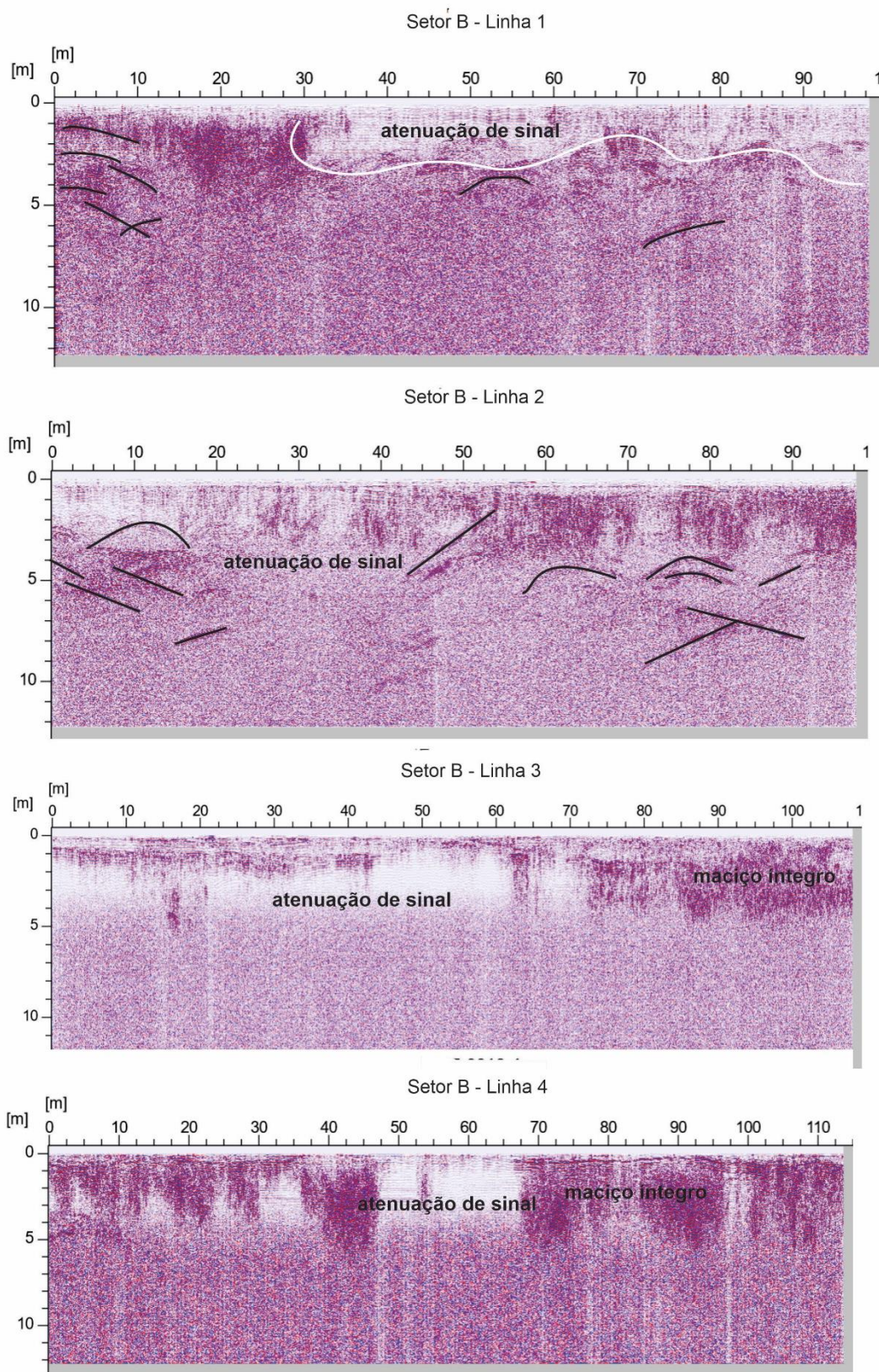
Poucas foram as fraturas identificadas no setor C, quando comparadas aos setores anteriores, possivelmente pela não projeção delas para o interior do maciço, uma vez que embora tenha ocorrido a atenuação do sinal eletromagnético em profundidade, a intensidade de atenuação foi inferior a dos setores A e B. A presença de água de maior relevância é identificada em subsuperfície na Linha 1 C e atinge pouco mais de 2 metros de profundidade (Figura 77). A saturação superficial pode ser advinda dos eventos pluviométricos anteriores aos trabalhos de aquisição de dados.

Figura 75: Radargramas obtidos no Setor A



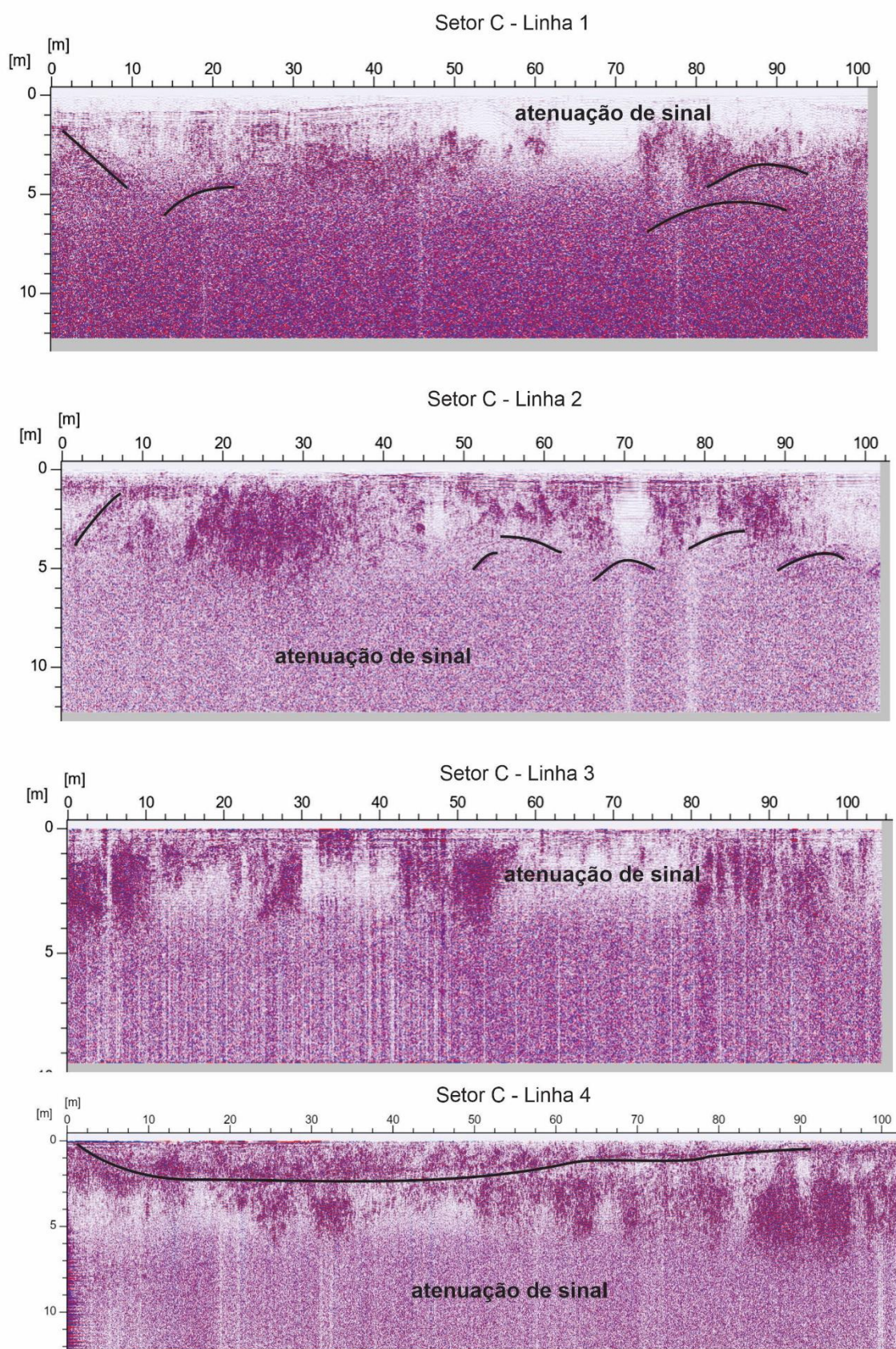
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 76: Radargramas obtidos no Setor B



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 77: Radargramas obtidos no Setor C



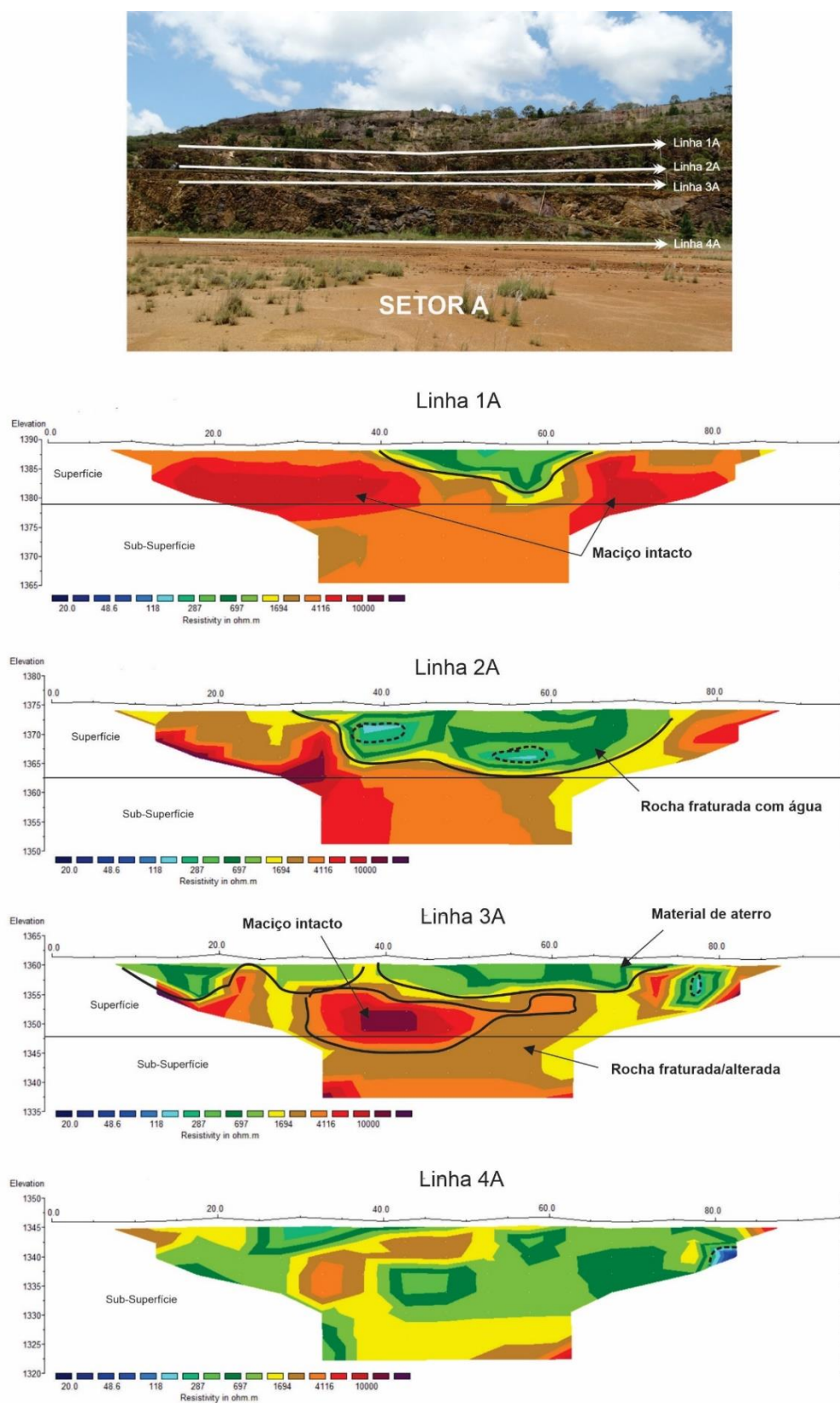
Fonte: elaborado pelo autor

8.3.2 Eletrorresistividade e Polarização Induzida

8.3.2.1 Setor A

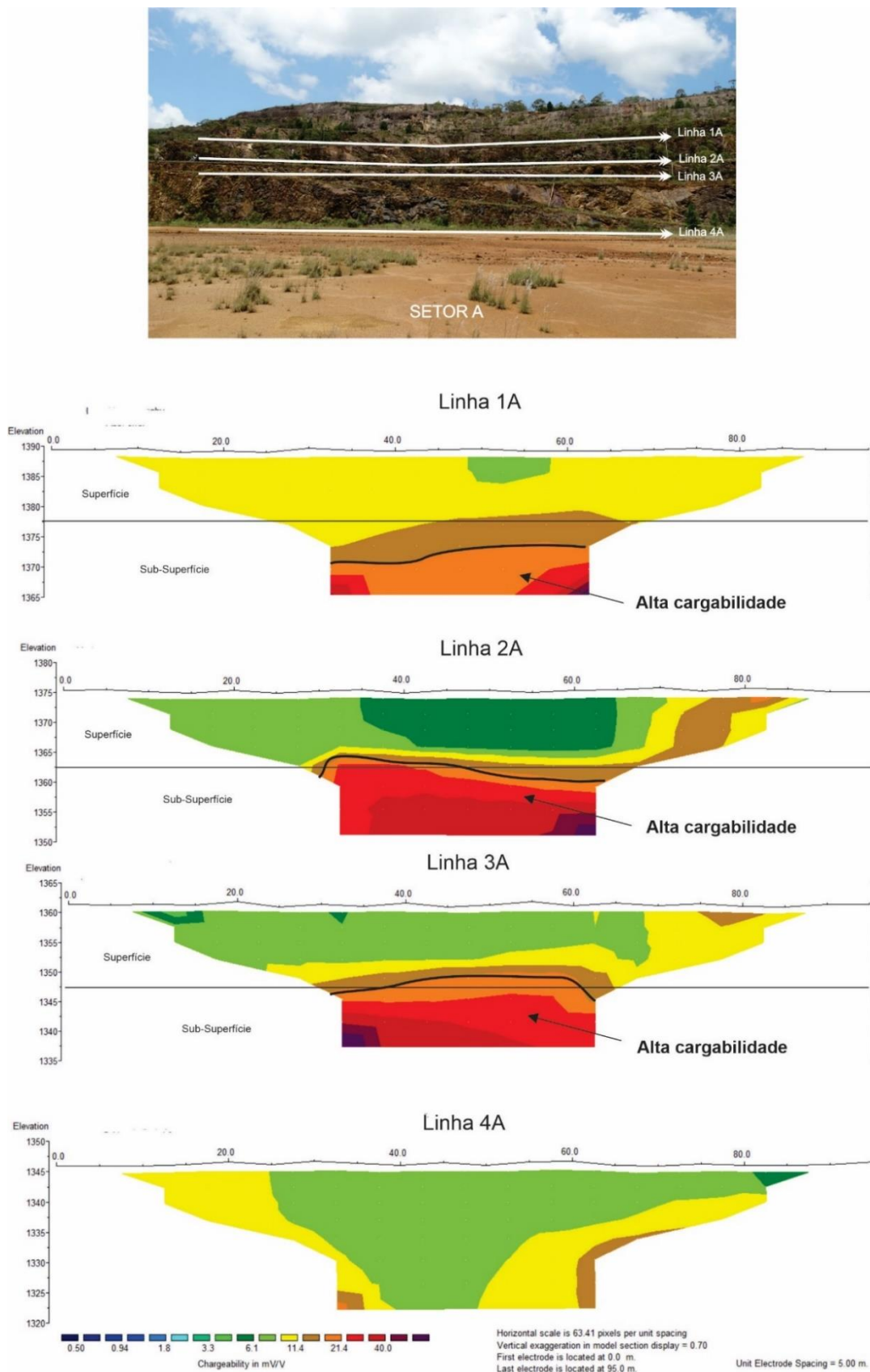
Os resultados geofísicos no Setor A apontaram diferença litológica ressaltada pela diferença de resistividade encontrada principalmente nas linhas 2 e 3 A: rocha inalterada mais resistiva (foiaito) com valores de resistividade a partir de 4116 $\Omega.m$ e rocha alterada (brecha) com valor de resistividade entre 697 $\Omega.m$ e 4116 $\Omega.m$ (Figura 78). Além disso, as linhas indicaram a presença de material saprolítico superficial indicado pelos valores de resistência entre 287 e 697 $\Omega.m$ e presença de água na posição 80 m do perfil (resistividade próxima a 118 $\Omega.m$). Com relação a cargabilidade foi possível notar que esta possui valores significativos (acima de 21,4 mV/V) principalmente nas Linhas 1, 2 e 3 A, nas cotas inferiores (subsuperfície). Em superfície (face visível do talude), os baixos valores de cargabilidade indicam que os sulfetos presentes na rocha foram oxidados e por isso são ausentes (Figura 79).

Figura 78: Resultados de resistividade elétrica para o Setor A



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 79: Resultados de cargabilidade (mV/V) obtidos no Setor A



Fonte: elaborado pelo autor

8.3.2.2 Setor B

Os resultados geofísicos apresentados nas Figuras 80 e 81 indicaram a presença de rochas fraturadas e/ou porosas por todo o setor B representadas por valores de resistividade entre 287 e 1694 $\Omega.m$, com exceção das Linhas 2 e 3B que apontou a presença de rocha inalterada em profundidade (acima de 4116 $\Omega.m$). Existem também zonas superficiais saturadas evidenciadas principalmente nas Linhas 1 e 2B com valores de resistividade inferiores a 118 $\Omega.m$ e em alguns pontos próximos a 20 $\Omega.m$, que indicam a presença de solutos em água.

Com relação a cargabilidade, os resultados indicaram a concentração de sulfetos em profundidade (Linhas 1, 2 e 3B) relacionadas com valores acima de 21,4 mV/V e corroboram com os resquícios de mineralização encontrados em campo: os sulfetos superficiais foram oxidados e estão concentrados somente em subsuperfície.

Figura 80: Resultados de resistividade elétrica para o Setor B

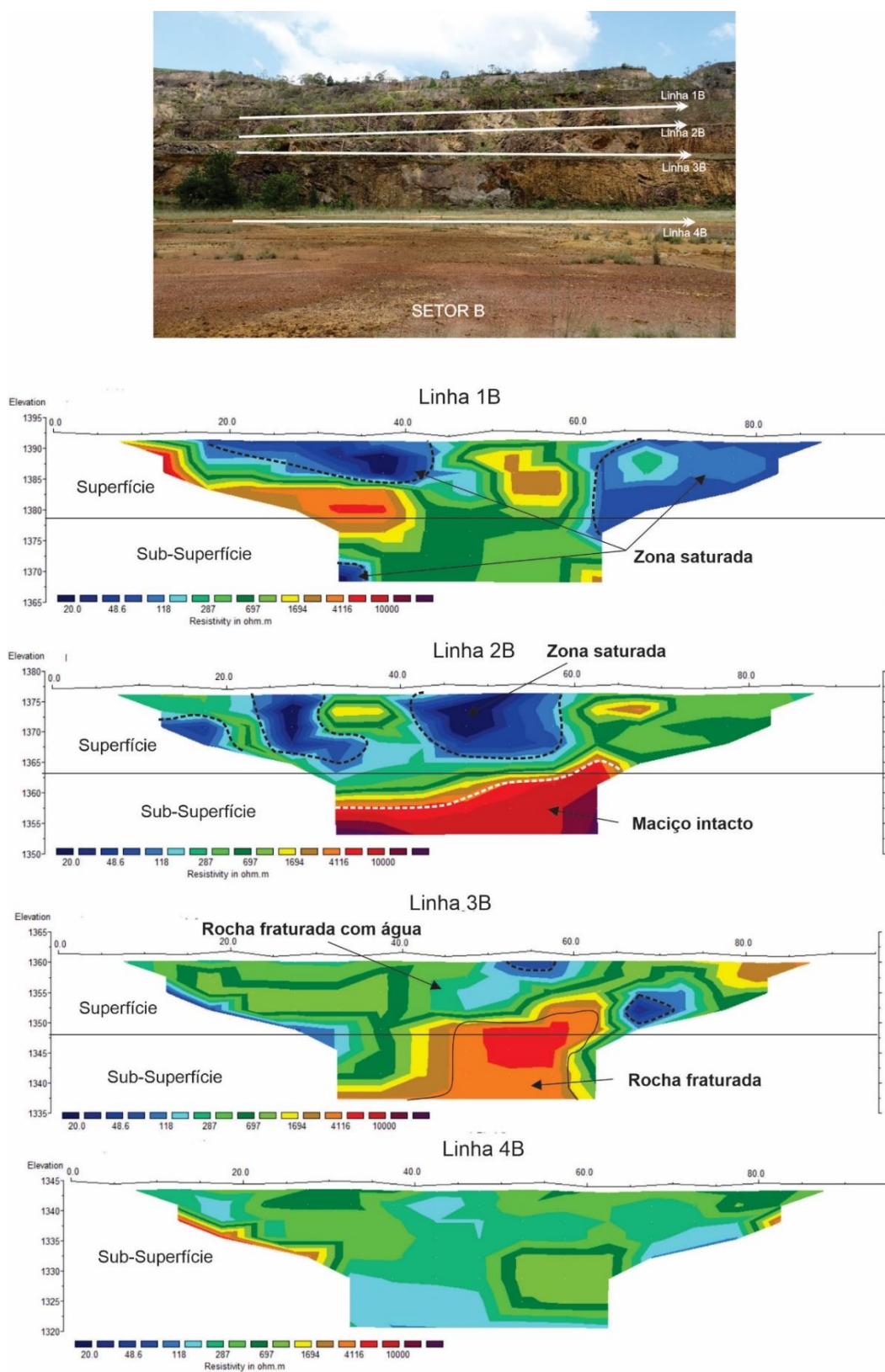
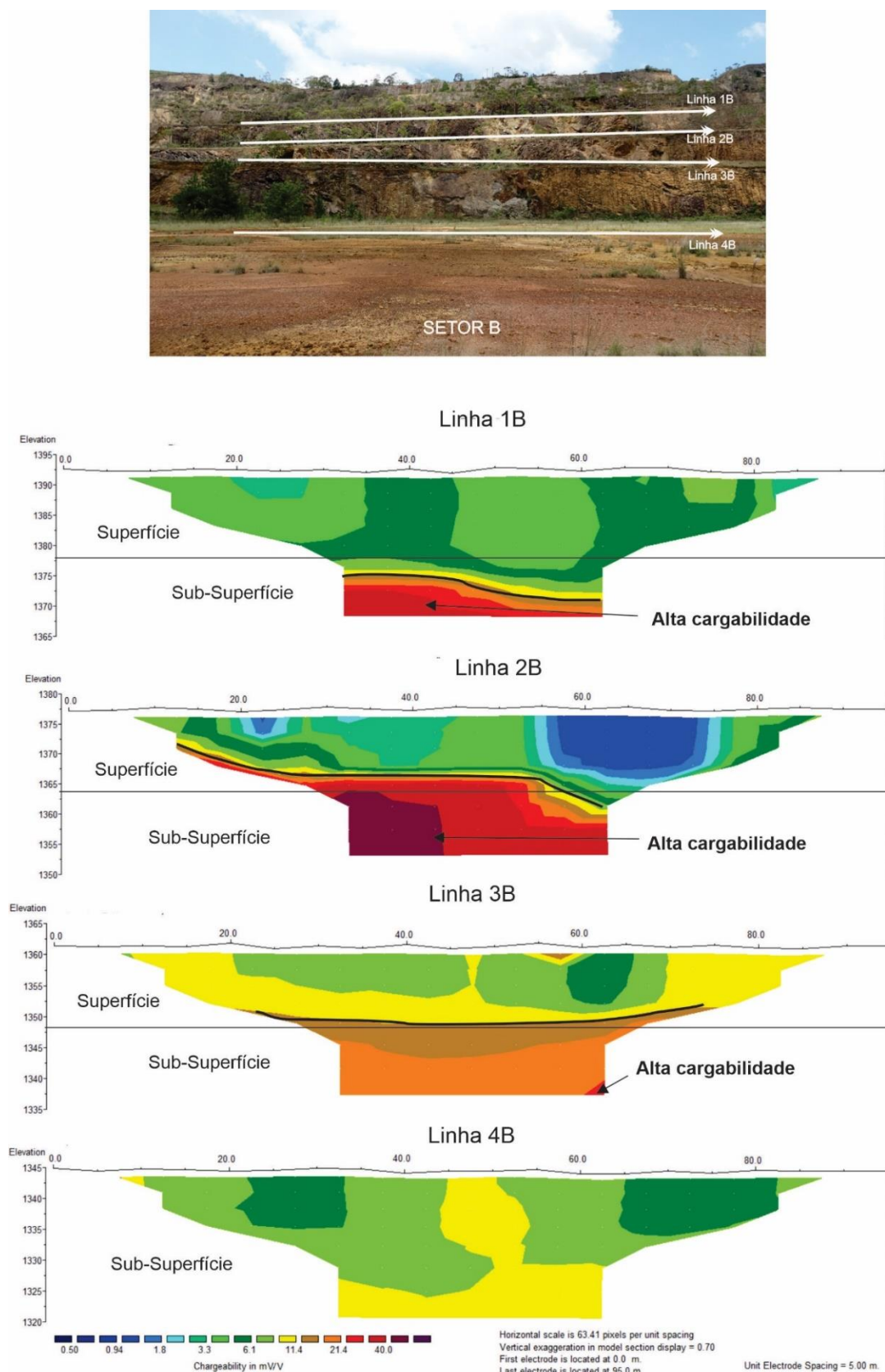


Figura 81: Resultados de cargabilidade (mV/V) obtidos no Setor B

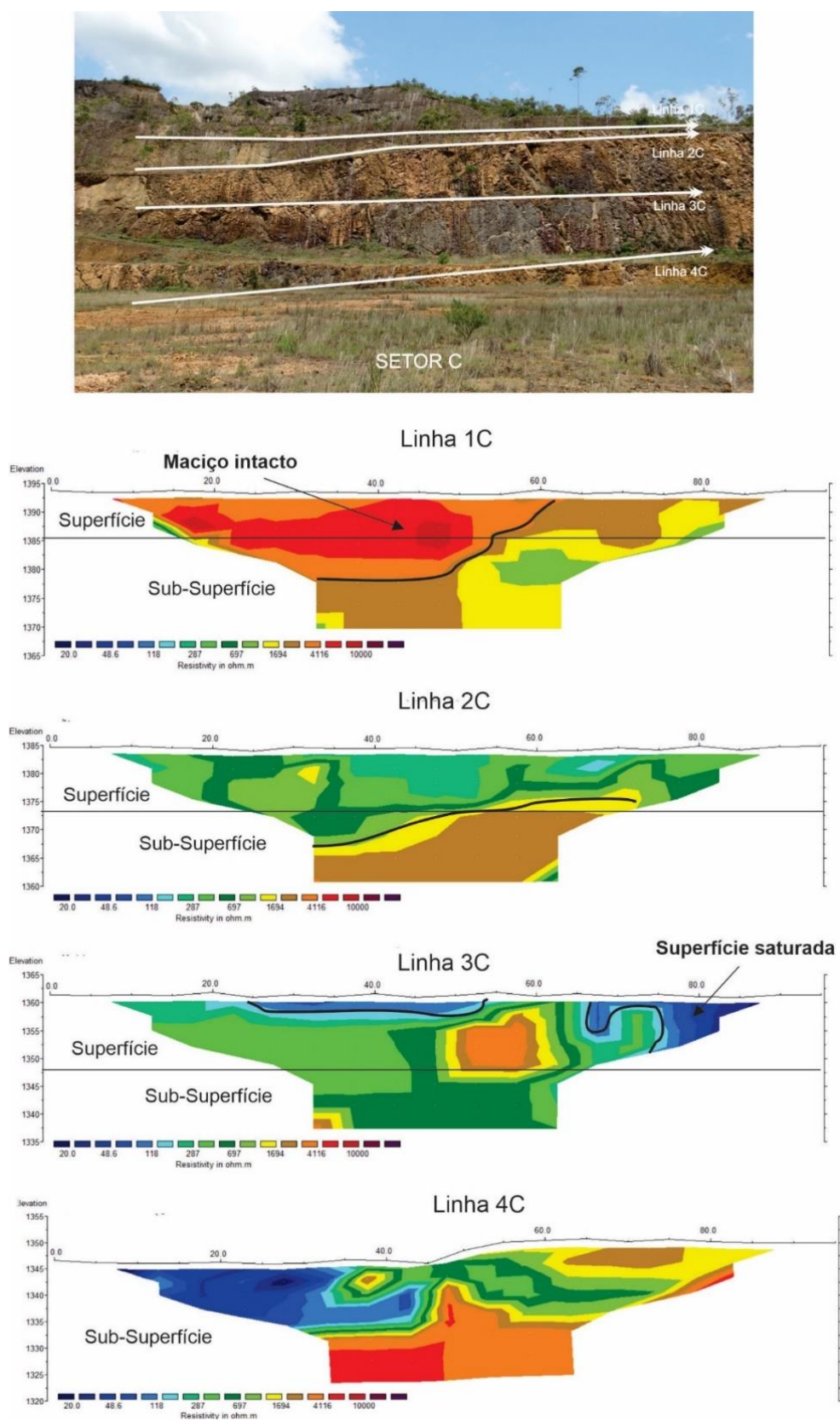


Fonte: elaborado pelo autor

8.3.2.3 Setor C

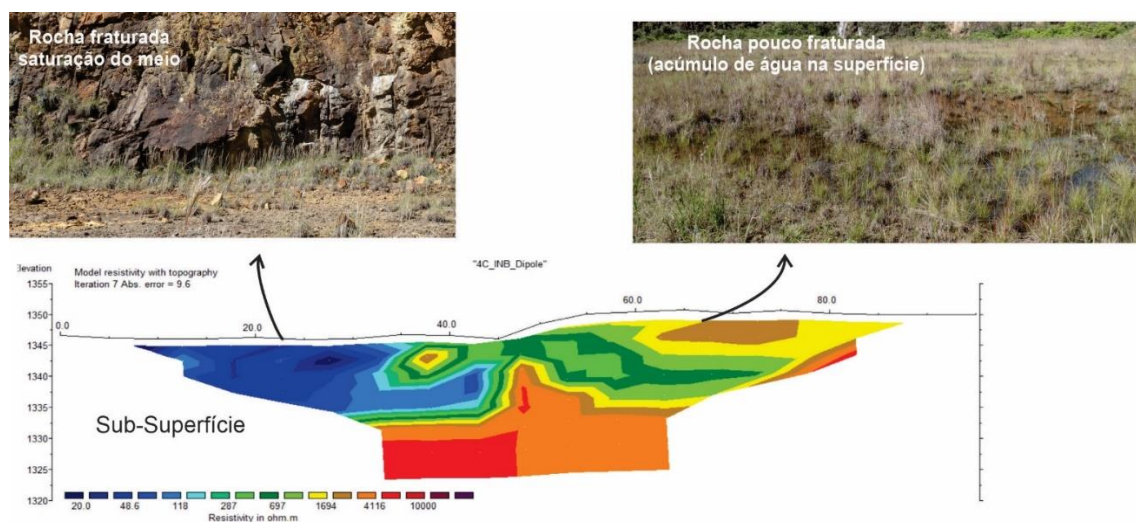
Os resultados geofísicos evidenciaram a presença de rochas fraturadas no setor C, com valores de resistividade entre 287 $\Omega.m$ e 1694 $\Omega.m$ e presença de acúmulo de água em zonas com resistividades inferiores a 118 $\Omega.m$ (Linhas 2, 3 e 4C) (Figura 82). A análise da linha 4C permite identificar materiais de subsuperfície heterogêneos, uma vez que nos primeiros 50 metros da linha, a baixa resistividade indica saturação do solo e consequentemente constituído por um material mais poroso. Nos últimos 50 metros, há presença de material inalterado e pouco fraturado que faz com que a água não infiltre e acarreta na formação de lâmina d'água em superfície (Figura 83). Com relação aos valores de cargabilidade obtidos, em todas as linhas executadas o valor é inferior a 21,4 mV/V o que indica baixa concentração de sulfetos, com exceção do encontrado na Linha 3C em profundidade (Figura 84).

Figura 82: Resultados de resistividade elétrica para o Setor C



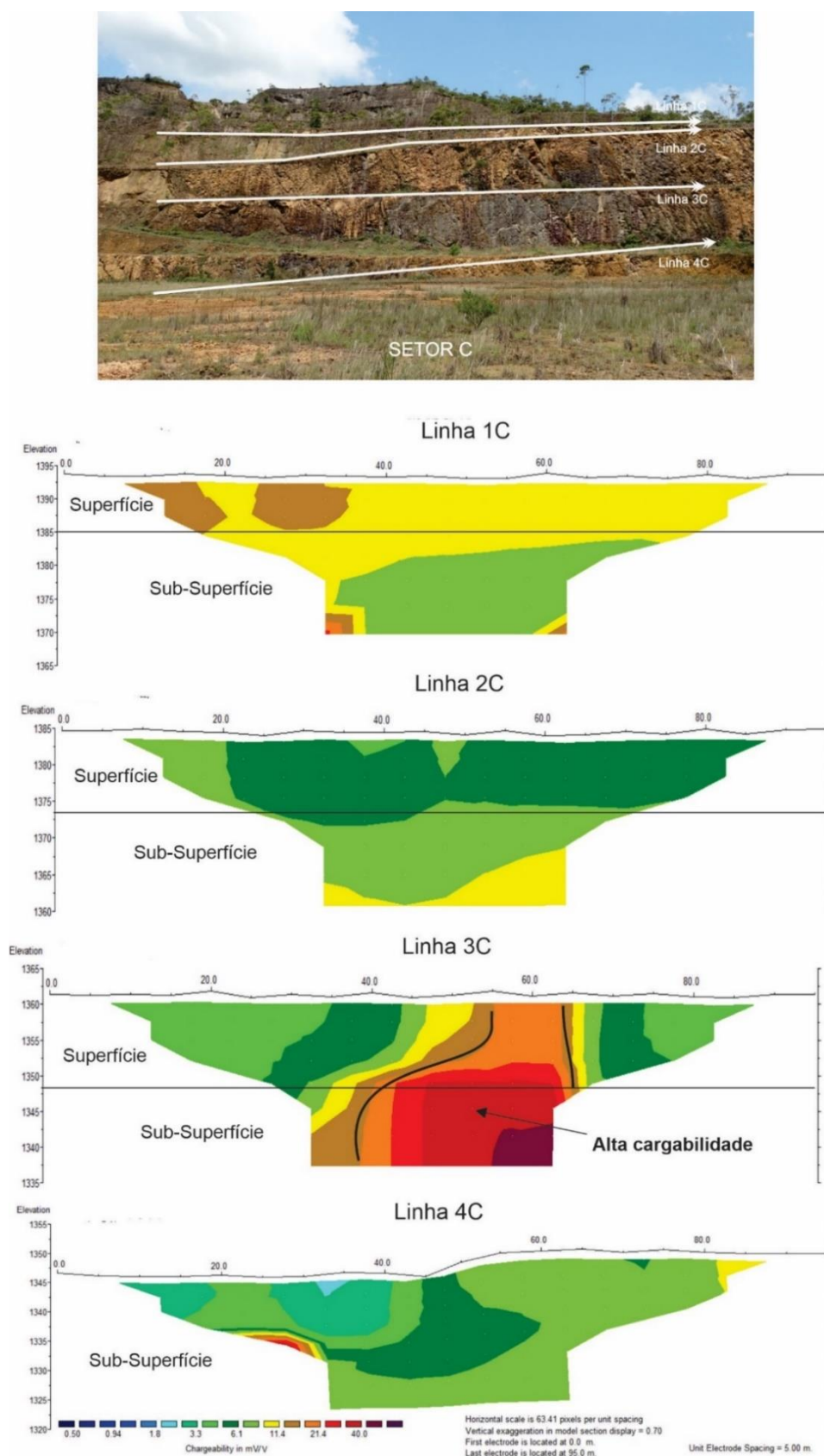
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 83: Linha 4C e diferenciação dos materiais



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 84: Resultados de cargabilidade (mV/V) obtidos no Setor C



Fonte: elaborado pelo autor

8.4 ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS

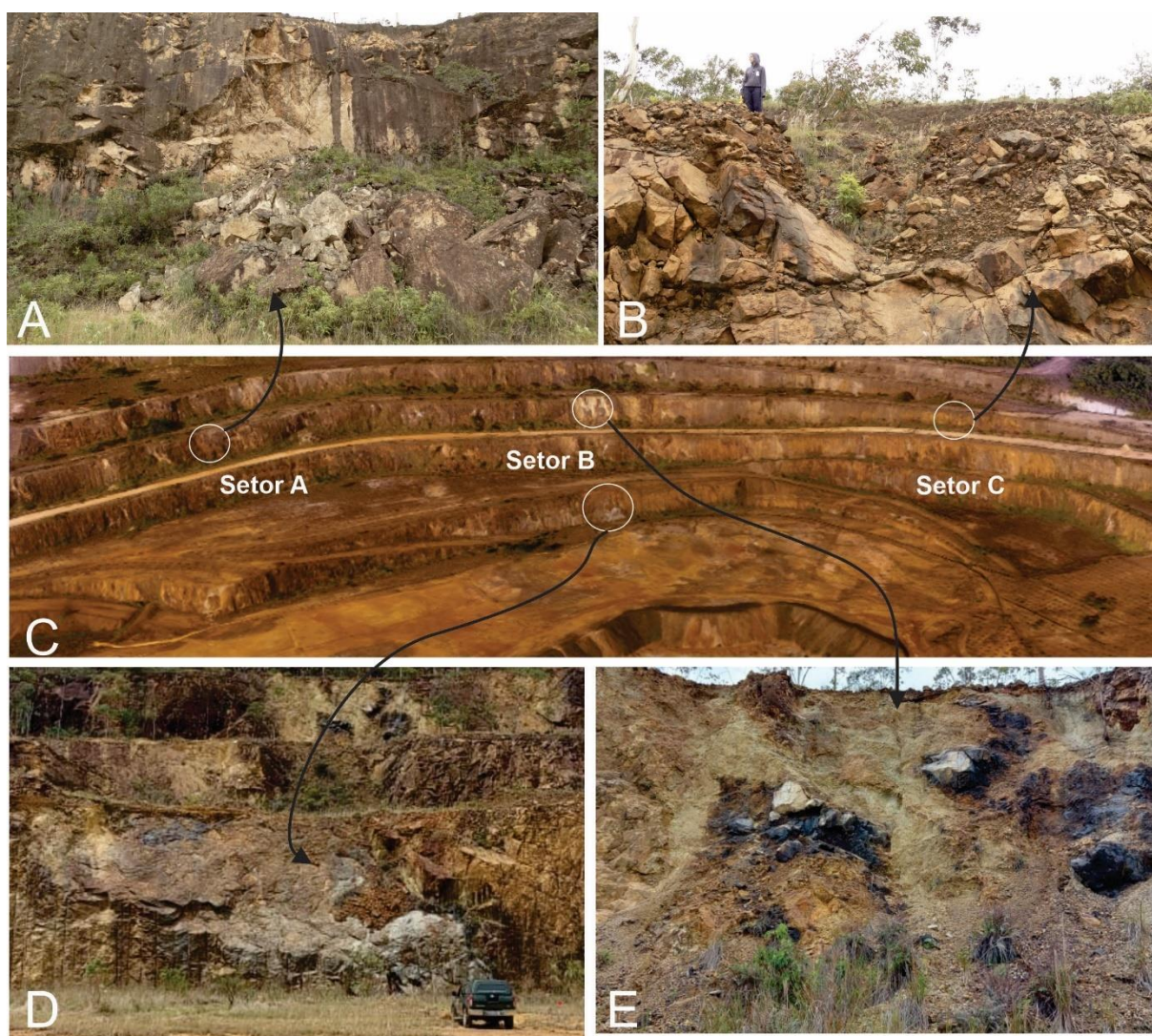
A Frente SE da cava da mina apresenta comportamentos geotécnicos distintos nos diferentes setores analisados. A presença de fraturas foi identificada em pontos específicos dos setores A e C (Figuras 85 A e 85 B) e sua densidade de ocorrência aumenta em zonas de minério residual, coincidentes com a litologia brechoide presente principalmente no Setor B (Figura 85 C). As zonas de minério residual possuem características de maior permeabilidade por causa de sua litologia e, portanto, são consideradas zonas de acúmulo de água e apresentam comportamento de aquíferos fraturados. Na Figura 85 E é visível a coloração amarelo-esverdeada do solo resultante do intemperismo e consequente desagregação da rocha e da presença do argilomineral clorita originado do processo de hidrotermalismo. Os blocos de rocha preto formados principalmente por óxido de magnésio são mais resistentes ao processo de intemperismo, logo, menos suscetíveis a desagregação e formação de saprólito/solo. Em 85 D a expressividade da ruptura é notável e atinge toda a altura do talude, cerca de 12 metros.

A análise dos radargramas originados com a coleta de dados permitiu identificar o contraste originado entre a constante dielétrica do maciço, presença de água e fraturas persistentes no interior do talude. O radargrama pertencente a Linha 1 A apontou a presença de maciço íntegro em grande parte da sua extensão, fato corroborado pela análise do modelo de resistividade elétrica, com base em elevados valores (próximo a $10.000 \Omega.m$) e maioria dos sinais eletromagnéticos refletidos (Figura 86).

É notável a presença de diferentes famílias de fraturas cujas intersecções foram identificadas tanto na análise visual quanto na interpretação do radargrama. A intersecção de fraturas pode ocasionar fraturas do tipo em cunha e consequentemente, tornar o maciço menos estável. A percolação de água por dentre as fraturas existentes no maciço tende a acelerar processos instabilizantes. O efeito provocado pelo fluxo de água nos taludes é de diminuição da resistência da rocha e, consequentemente queda no fator de segurança, com possibilidade de ruptura iminente. Entre os 40 e 50 metros lineares percorridos a uma profundidade de aproximadamente 6 metros, foi observado no modelo de resistividade elétrica uma diminuição da resistividade da rocha, o que indica a desagregação do maciço, que em

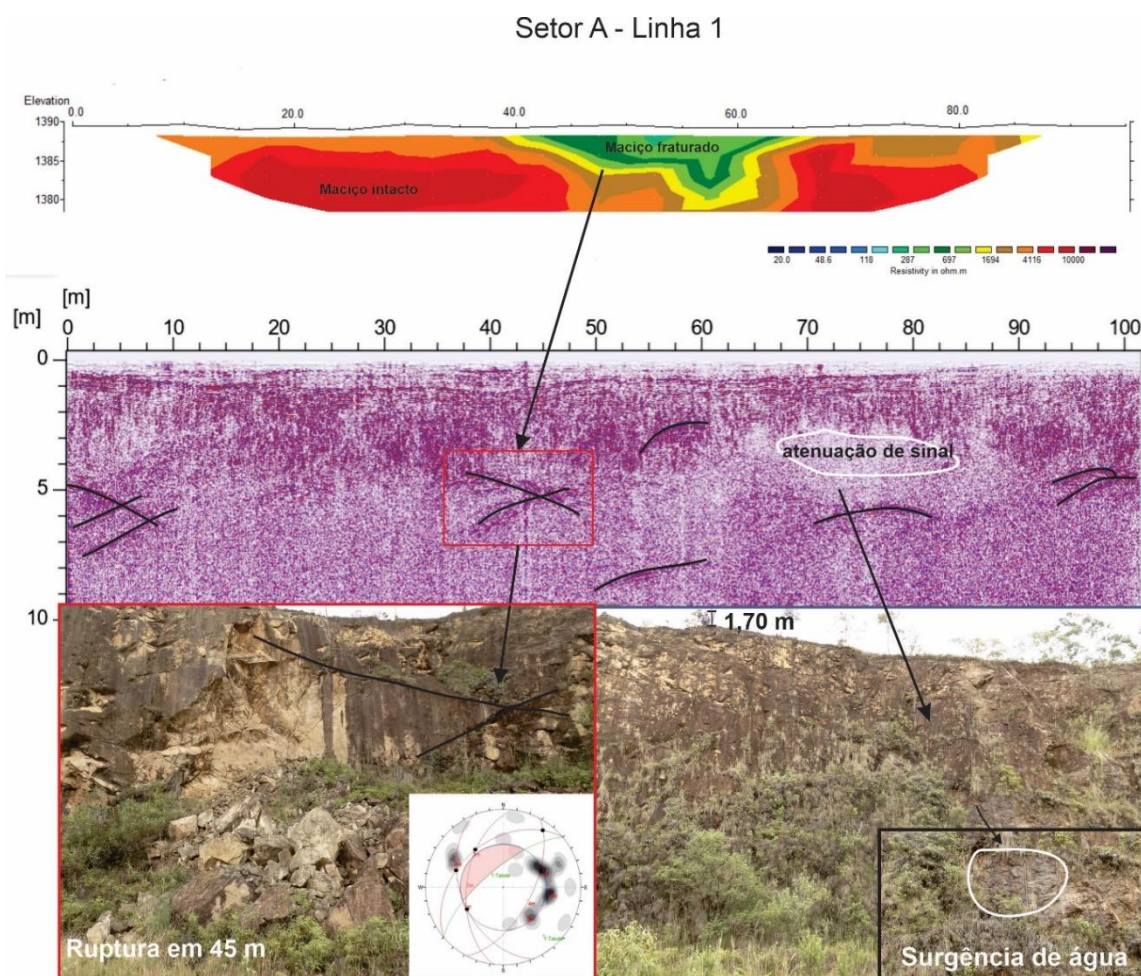
campo é concordante com a ruptura encontrada. Além disso, uma pequena zona de atenuação de sinal foi encontrada próxima a 4 metros de profundidade, concordante com surgência de água verificada na face. Porém, dada a ausência de zonas de baixa eletrorresistividade, esta pode ser advinda da percolação superficial pelos eventos pluviométricos anteriores.

Figura 85: Frente SE e diferentes pontos com rupturas



Fonte: elaborado pelo autor

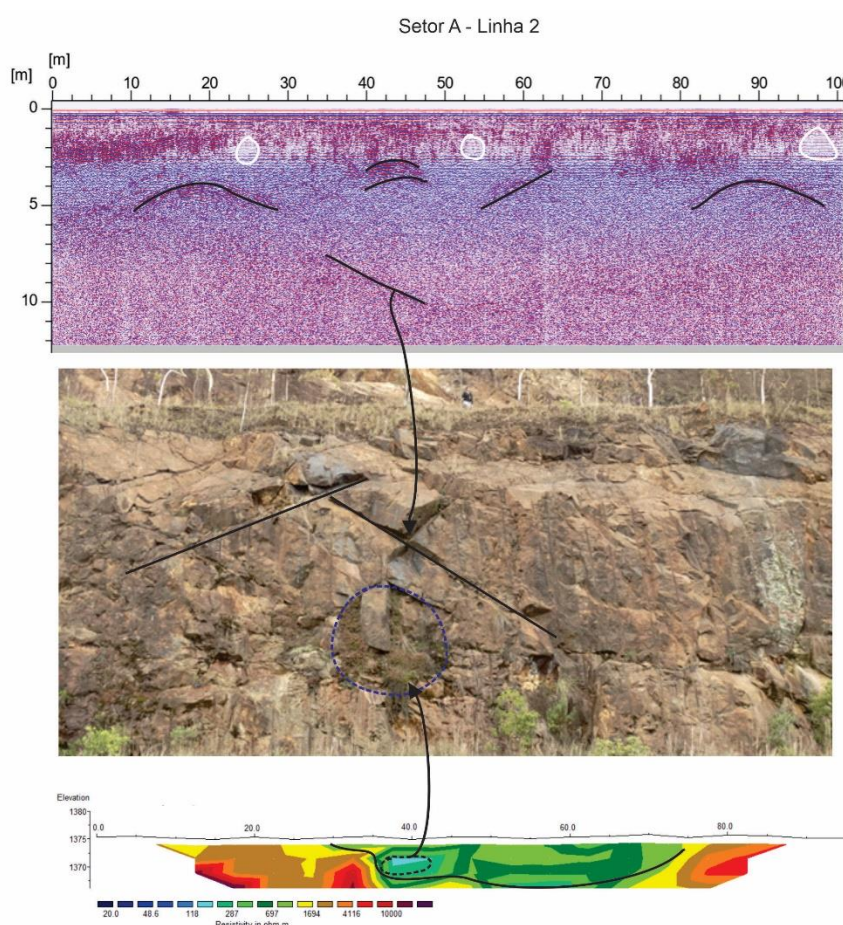
Figura 86: Correlação do radargrama 1A com modelo de resistividade elétrica e análise visual



As zonas de atenuação do sinal eletromagnético presentes na Linha 2 A foram pontuais, escassos e presentes próximo a superfície, entre 1 e 2 metros de profundidade e podem estar relacionadas a infiltração da água das chuvas ocorridas nos dias anteriores a coleta de dados. É notável a identificação de zona pouco resistiva, aproximadamente 118 $\Omega.m$, próximo ao pé do talude, a 10 metros de profundidade do modelo de resistividade elétrica, que pode estar associada a presença de água no interior do maciço. O modelo de resistividade elétrica sugere ainda a presença de rocha fraturada entre 40 e 70 metros de extensão do talude, com valores de resistividade próximos a 697 $\Omega.m$, com presença de fraturas verificáveis no radargrama (Figura 87). A litologia predominante neste setor é o foiaito com possibilidade de fluxo de água de maneira rápida e contínua, sem o armazenamento e possibilidade de formação de aquífero fraturado. De acordo com Bell *et al.*, (1997) e

Gökçeoglu *et al*, (2000) a variação de umidade pode provocar movimentos de expansão e contração da rocha que acarretam na diminuição de sua resistência, aumento da deformabilidade e desenvolvimento de argilo-minerais, que aceleram o processo de desagregação do maciço e consequentemente o torna mais instável.

Figura 87: Correlação do radargrama 2A com modelo de resistividade elétrica e análise visual

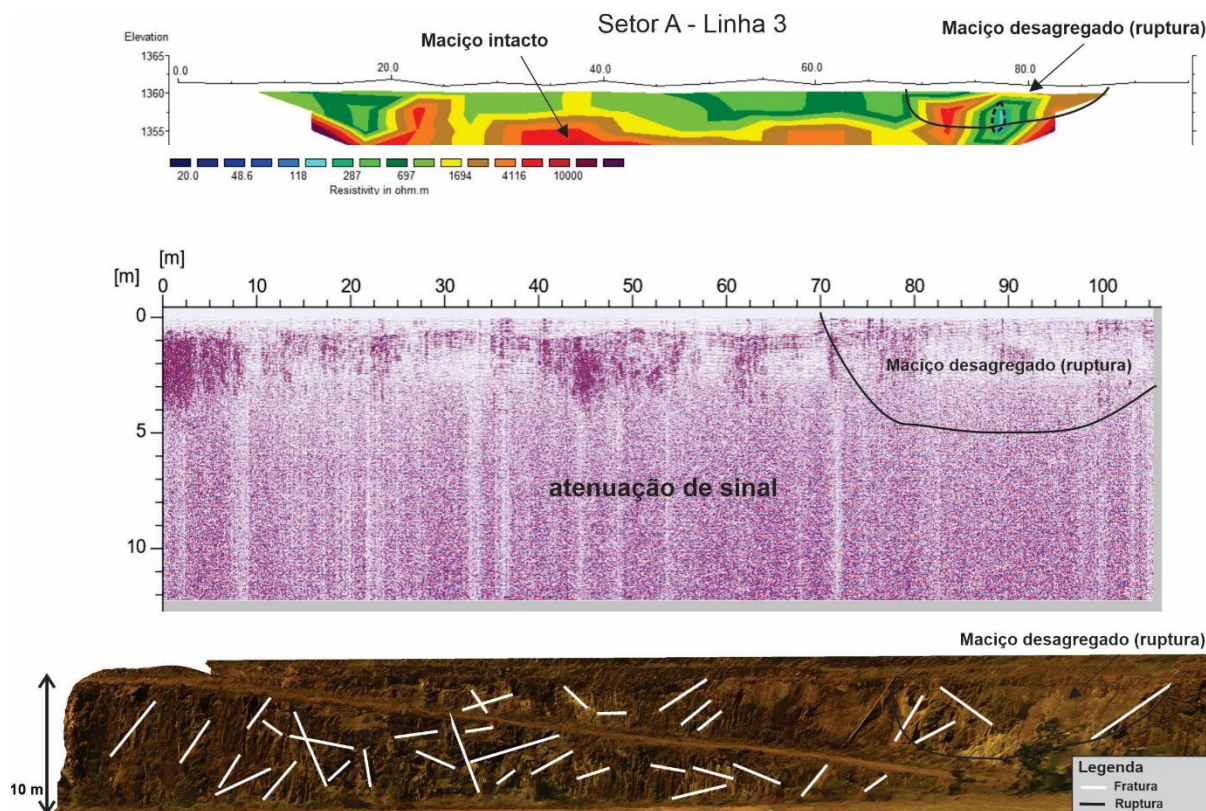


Fonte: elaborado pelo autor

Ao observar e correlacionar os dados obtidos de eletrorresistividade, análise visual de face e GPR para a Linha 3 A, foi possível notar a atenuação do sinal por todo o maciço nos primeiros 10 metros de profundidade, com a impossibilidade de identificação das fraturas visíveis na face (Figura 88). O modelo de resistividade elétrica apontou maciço fraturado em toda a sua extensão com identificação de pontos de resistividade abaixo de $110 \Omega.m$, e sugere a ocorrência de água aprisionada nas fraturas. Concordante a este ponto, e a zona de maior atenuação de sinal, próximo a

80 metros lineares percorridos, foi verificada a ocorrência de uma ruptura do tipo planar.

Figura 88: Correlação do radargrama 3A com modelo de resistividade elétrica e análise visual

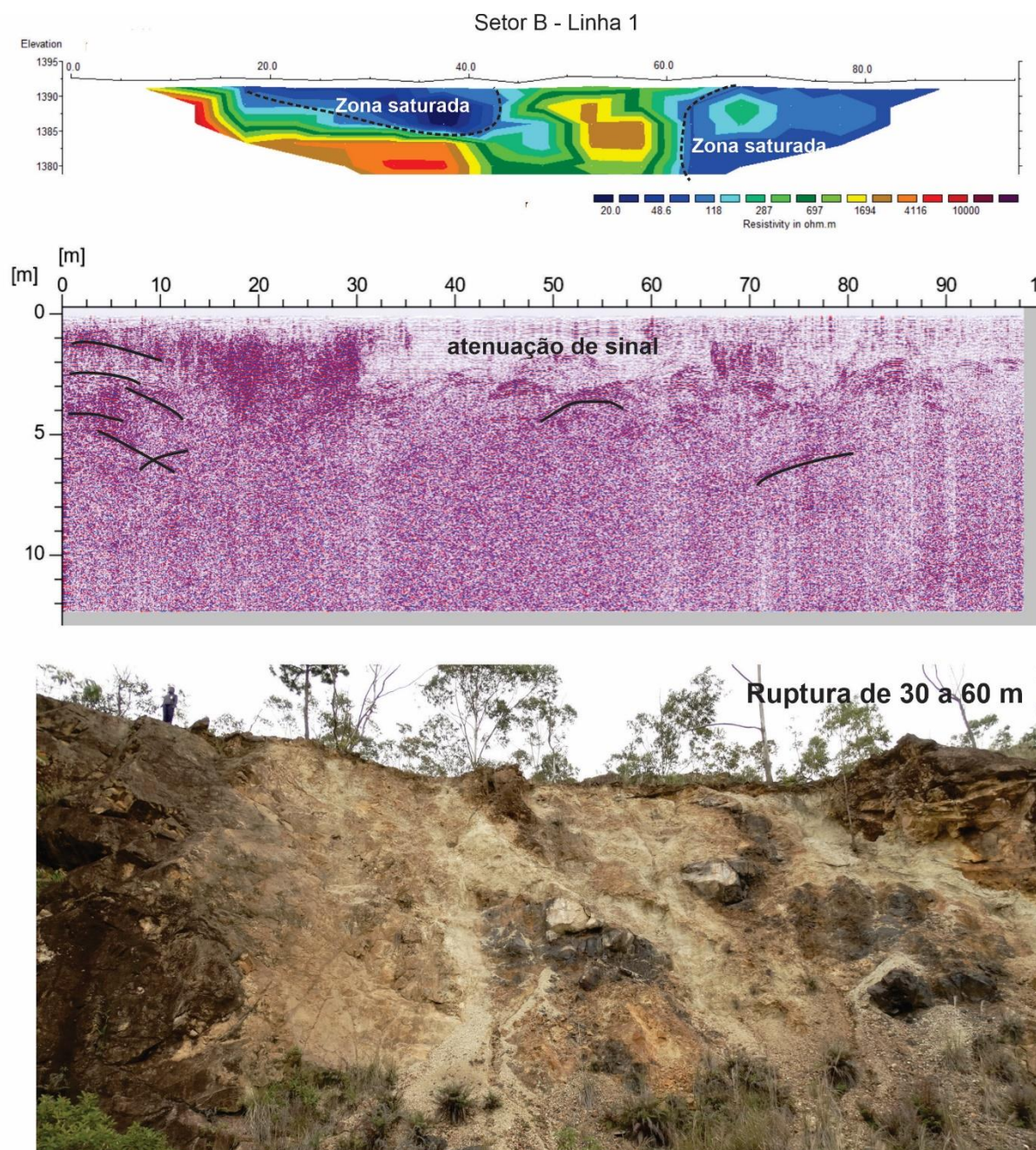


Fonte: elaborado pelo autor

O Setor B apresenta extensa mancha de coloração verde-amarelada que atinge todas as bancadas. Dadas as características verificadas em campo, trata-se de uma zona de minério residual, de litologia predominantemente brechoide, de alta permeabilidade e intensa ação do intemperismo. Devido a alta capacidade de armazenamento de água nas brechas, é provável que nestes locais o fluxo de água seja lento e sejam formados aquíferos fraturados com aprisionamento da água e elevação da poropressão em subsuperfície. A ruptura presente na Linha 1 B atinge extensão de aproximadamente 30 metros e profundidade de cerca de 10 metros. O radargrama identificou a ocorrência de grande zona de atenuação de sinal, concordante a ruptura e indica, portanto, a existência de água aprisionada no maciço. A presença da água em subsuperfície é comprovada na análise do modelo de

resistividade elétrica, cujo qual apresenta valores de resistividade abaixo de $118 \Omega.m$ na maior parte da extensão do maciço (Figura 89).

Figura 89: Correlação do radargrama 1B com modelo de resistividade elétrica e análise visual

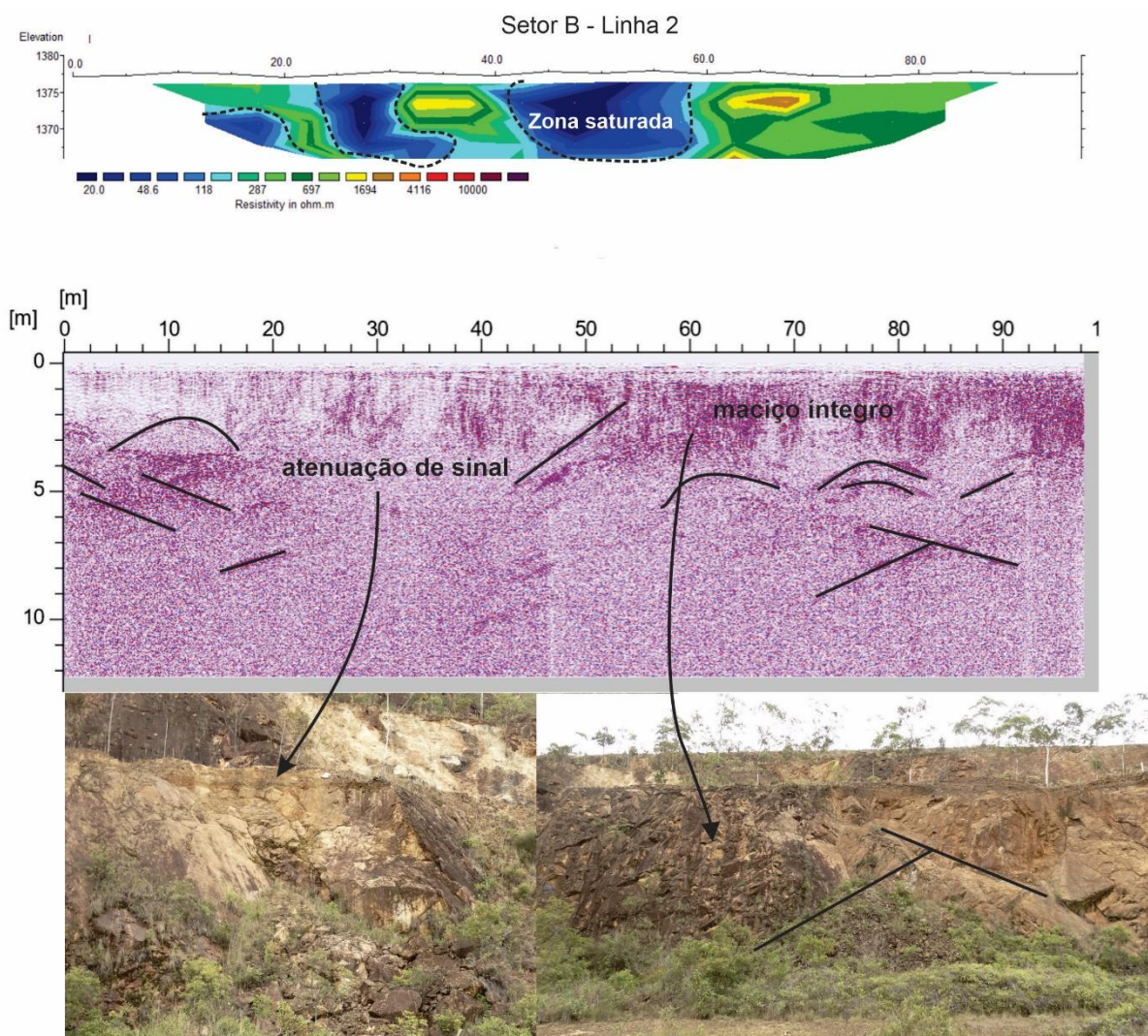


Fonte: elaborado pelo autor

A Linha 2 do Setor B permitiu a distinção de zonas instáveis nos primeiros 40 metros, e maciço estável nos últimos 50 metros, concordantes com zonas de minério residual, onde está presente a ruptura, e o restante com a litologia predominantemente

de foiaito, com coloração mais escura e de menor permeabilidade (Figura 90). Ao observar o modelo de resistividade elétrica, os aquíferos presentes no maciço estão concentrados até os 60 metros de sua extensão, indicativo de que onde estão situadas as zonas mineralizadas possuem maior capacidade de armazenamento de água. A presença deste aquífero fraturado em subsuperfície aliado com as condições estruturais e cinemáticas do maciço apresentadas anteriormente, ocasionam rupturas generalizadas.

Figura 90: Correlação do radargrama 2B com modelo de resistividade elétrica e análise visual

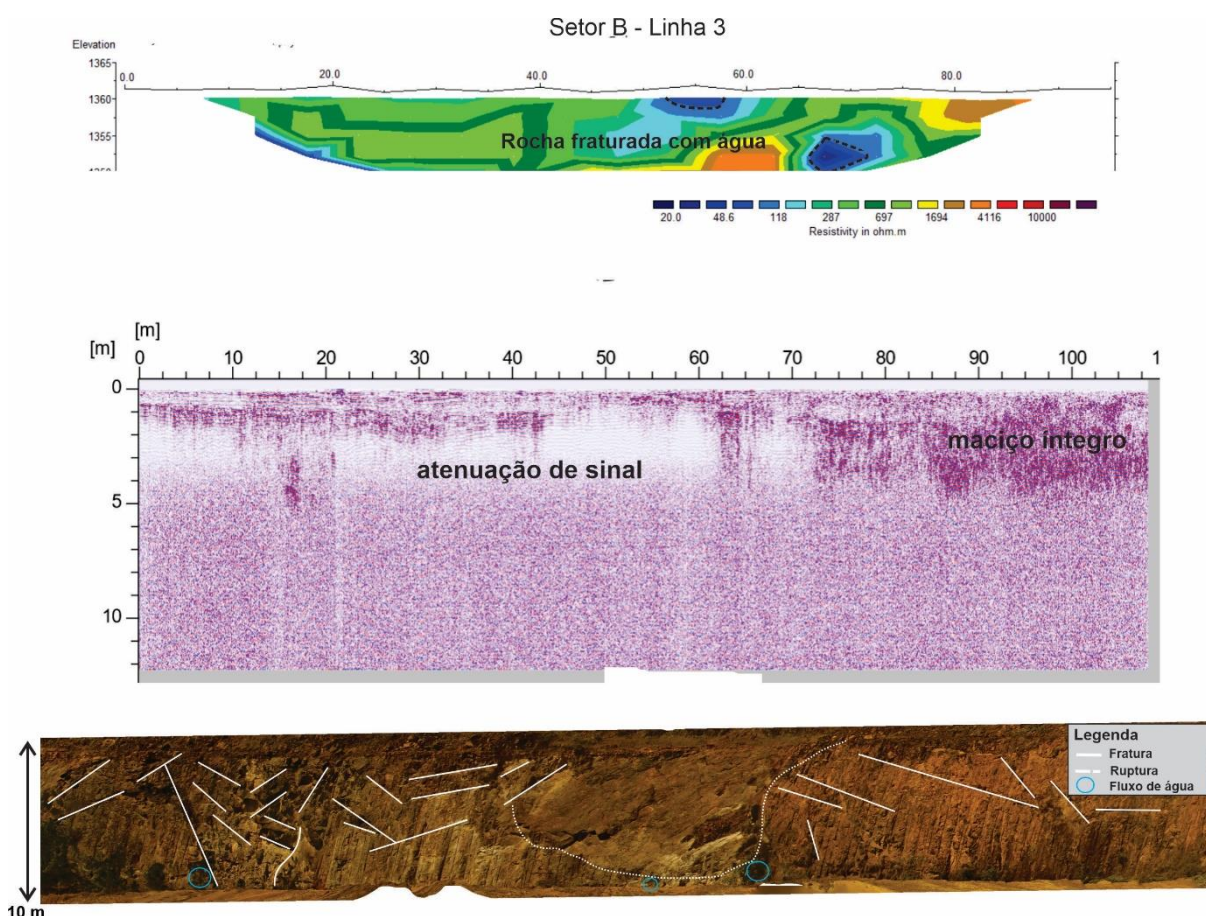


Fonte: elaborado pelo autor

A terceira bancada do setor B possui ruptura de grande monta que atinge os 12 metros de altura do talude e está localizada no centro deste setor. Na análise visual

de face foi possível observar pontos de surgência de água próximos ao pé do talude, que também foram identificados no modelo de resistividade elétrica (Figura 91). Os valores de resistividade encontrados para este maciço não ultrapassaram os $1.694 \Omega.m$ e indicam material muito fraturado e desagregado, concordante com a litologia brechoide muito intemperizada observada em campo. O sinal eletromagnético emitido pelo GPR foi bastante atenuado até os 70 metros do setor e em profundidade, e confirma a saturação do maciço no local da ruptura. Os metros finais do setor foram classificados como foiaitos, fraturados, porém sem percolação de água e de maior integridade, visualmente notada pela conservação dos barriletes de perfuração.

Figura 91: Correlação do radargrama 3B com modelo de resistividade elétrica e análise visual

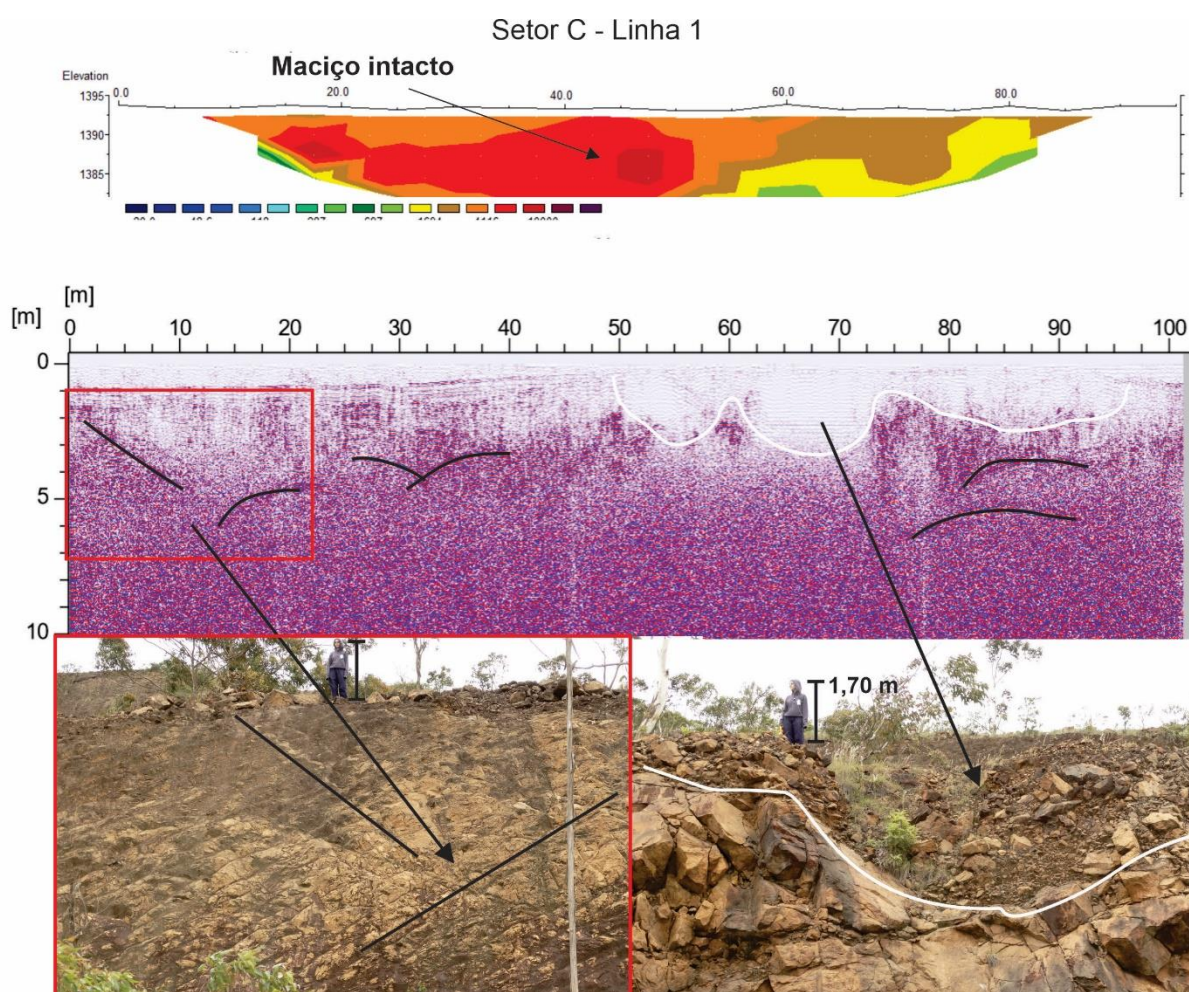


Fonte: elaborado pelo autor

O radargrama do Setor C linha 1 identificou maior zona de atenuação de sinal próximo a superfície e dada a inexistência de água no modelo de resistividade elétrica, essa atenuação pode ser oriunda de uma saturação superficial do material

desagregado presente no talude, conforme expresso em análise visual da face (Figura 92). A ruptura presente neste caso pode estar associada a locais mais próximos a superfície, onde a rocha, foi aito em épocas de elevada pluviosidade satura e acelera seu processo de desagregação, com a formação de saprólitos menos resistentes. O restante do maciço é encontrado de forma íntegra com possibilidade de identificação das fraturas presentes na face no radargrama.

Figura 92: Correlação do radargrama 1C com modelo de resistividade elétrica e análise visual

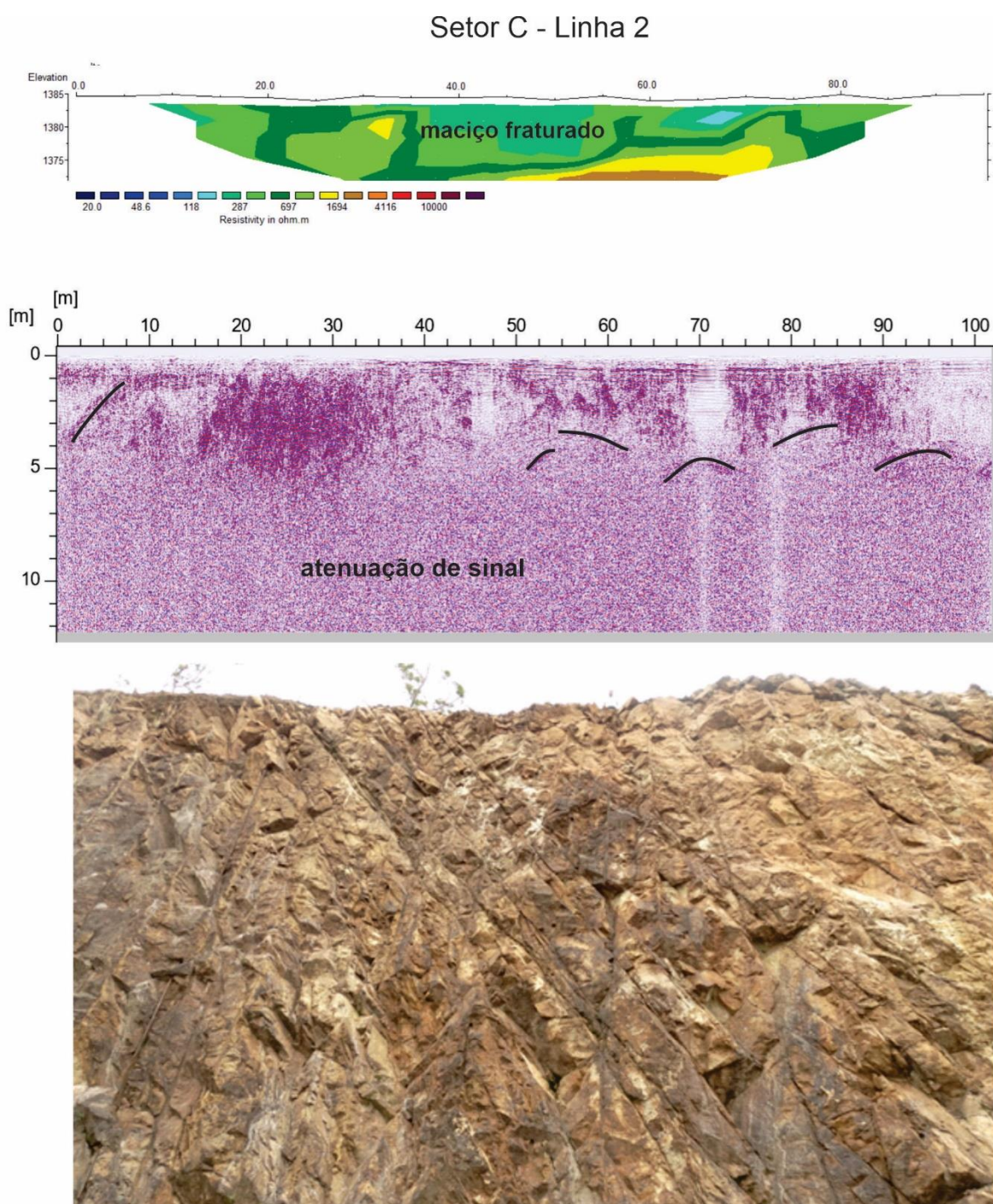


Fonte: elaborado pelo autor

A análise visual da face do talude correlacionado ao radargrama da linha 2 C e ao modelo de resistividade elétrica, apontou a existência de um maciço extremamente fraturado, porém sem surgência de água na face, ou mesmo existência de aquíferos fraturados. A atenuação do sinal pode ser devido a saturação da superfície que consequentemente percolou pelas fraturas devido ao elevado índice pluviométrico dos

dias antecedentes (Figura 93). Não há sinal de rupturas neste maciço, o que corrobora com a análise cinemática apresentada anteriormente. A litologia predominante é o tinguaíto, de elevada resistência (acima de 50 MPa) que contribui com a integridade do maciço, mesmo com a presença de fraturas.

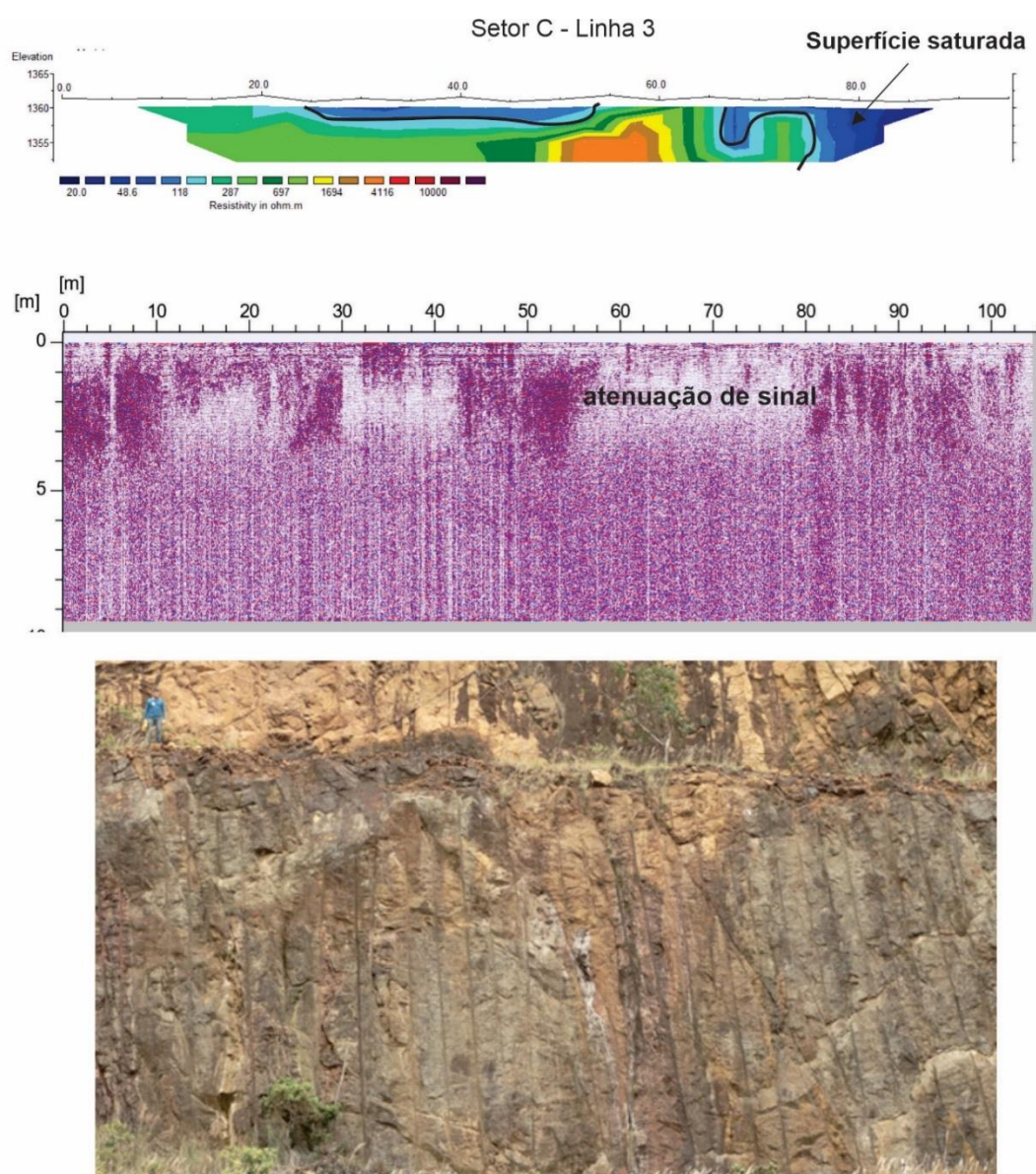
Figura 93: Correlação do radargrama 2C com modelo de resistividade elétrica e análise visual



Fonte: elaborado pelo autor

A Linha 3C apresenta comportamento semelhante a 2C, porém com saturação superficial evidenciada pelo modelo de resistividade elétrica. É notável a integridade do maciço na análise visual e também a maior resistência do tinguaíto frente as demais litologias presentes na cava, devido a ausência de rupturas, bem como da conservação dos barriletes utilizados na perfuração da rocha nos anos em que a mina era operante (Figura 94). A atenuação do sinal eletromagnético é de menor intensidade quando comparado ao da linha 2C e pode induzir a não conectividade das fraturas presentes no maciço, de modo que a água não infiltre em profundidade.

Figura 94: Correlação do radargrama 3C com modelo de resistividade elétrica e análise visual



Fonte: elaborado pelo autor

Para correlação e análise dos resultados do modelo de resistividade elétrica e cargabilidade, com vistas a obter informações sobre drenagem ácida, é importante considerar a profundidade atingida pela investigação geofísica (aproximadamente 30 metros). Destes 30 metros, cerca de 12 metros refletem as características visíveis, ou seja, de superfície (face do talude) e o restante, reflete as características em profundidade que irão influenciar no talude inferior (Figura 95).

Figura 95: Esquema representativo da interpretação dos resultados do modelo de resistividade elétrica e cargabilidade

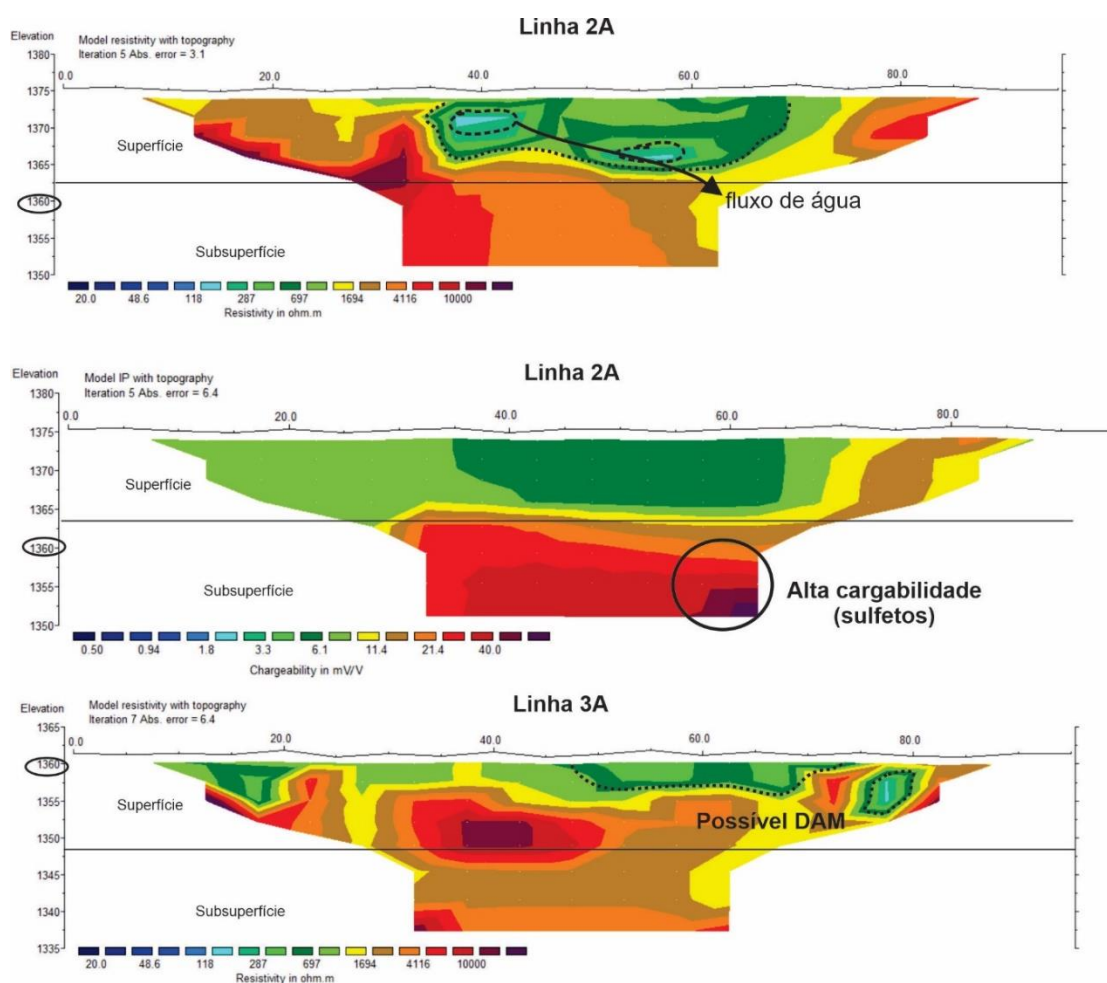


Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados geofísicos no Setor A apontaram dois possíveis pontos de geração de drenagem ácida, entre as linhas 2 e 4. O modelo de inversão da linha 2 A (Figura 96) indica concentração de rochas maciças nos primeiros metros em profundidade, compostas principalmente por foiaito. Entre os 40 e 70 metros da linha geofísica é possível notar zona de resistividade intermediária (entre 287 a 697 $\Omega.m$) compatível com a existência de saprolitos e rochas com grande alteração. Dentre essas zonas alteradas, são verificadas duas ocorrências de água armazenada, com resistividade próxima a 118 $\Omega.m$, que diante da existência de rochas fraturadas em profundidade (1694 $\Omega.m$) pode vir a gerar fluxo desta água para cotas abaixo de 1360 m. Entre as cotas 1360 e 1350, o modelo de inversão de cargabilidade da Linha 2 A apontou zona de alta cargabilidade, ou seja, alta concentração de sulfetos, valores acima de 21,4 mV/V. De acordo com alguns estudos há proporcionalidade direta entre teor de sulfetos e cargabilidade que relacionam zonas de cargabilidade próximas a 10

mV/V com sulfetos disseminados pela rocha e acima de 20 mV/V a zonas com alta concentração de sulfetos (Casagrande *et al.*, 2018; do Nascimento, 2022). A linha imediatamente inferior (3A) apresenta nesta mesma cota, próximo a 80 metros de extensão, zonas de surgência de água, que possivelmente apresentam caráter ácido, dado o fluxo de água coincidente com a região de alta concentração de sulfetos.

Figura 96: Possível ponto de geração de drenagem ácida – Linhas 2 e 3^a

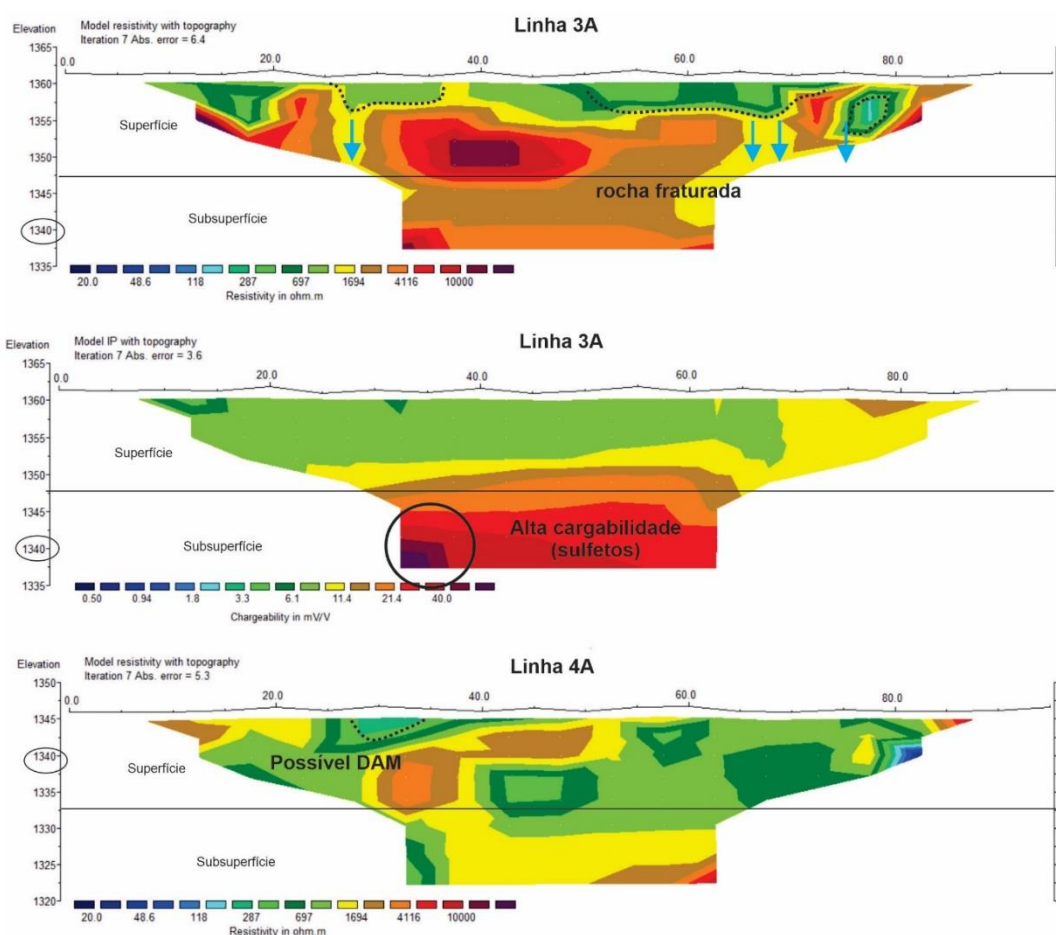


Fonte: elaborado pelo autor

Outro local suscetível a formação de drenagem ácida ocorre entre as linhas 3A e 4A. A Linha 3 A apresenta na cota de subsuperfície próxima 1340 metros alto valor de cargabilidade (40 mV/V) o que indica alta concentração de sulfetos. Nesta mesma linha, os resultados indicam existência de água em superfície que pode vir a apresentar fluxo pelas fraturas da rocha presente em subsuperfície, com resistividade próxima a 1694 Ω .m. Imediatamente abaixo, na Linha 4 A, próximo a cota de 1340

metros, são verificadas duas condições de baixos valores de resistividade, também possíveis de serem caracterizados como águas ácidas diante da combinação da alta cargabilidade registrada na linha anterior (Figura 97).

Figura 97: Possível ponto de geração de drenagem ácida – Linhas 3 e 4^a

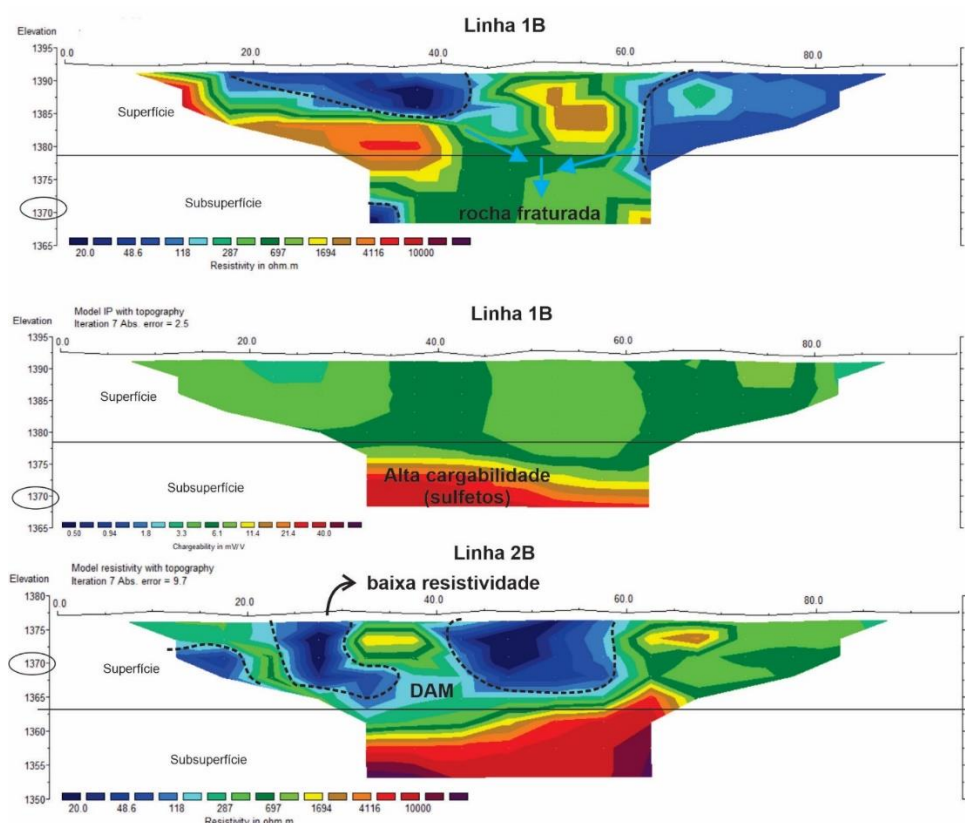


Fonte: elaborado pelo autor

A análise do Setor B permitiu inferir a existência de dois pontos com maior probabilidade de geração de drenagem ácida, uma vez que reúnem duas principais características para sua formação: baixa resistividade devido a saturação e percolação de água e alta cargabilidade devido a concentração de sulfetos. A Linha 1 B apresenta zonas de saturação do maciço, contornadas entre 50 e 60 metros por rochas saprolíticas, porosas, de litologia predominante de brecha em profundidade. No modelo de resistividade elétrica é possível observar que os valores de resistividade não ultrapassam 1.694 $\Omega.m$, característica de rocha mais porosa e mais alterada, assim como demonstrado em trabalhos de Kukkonen *et al.*, 1992; Guo *et al.*, 2013).

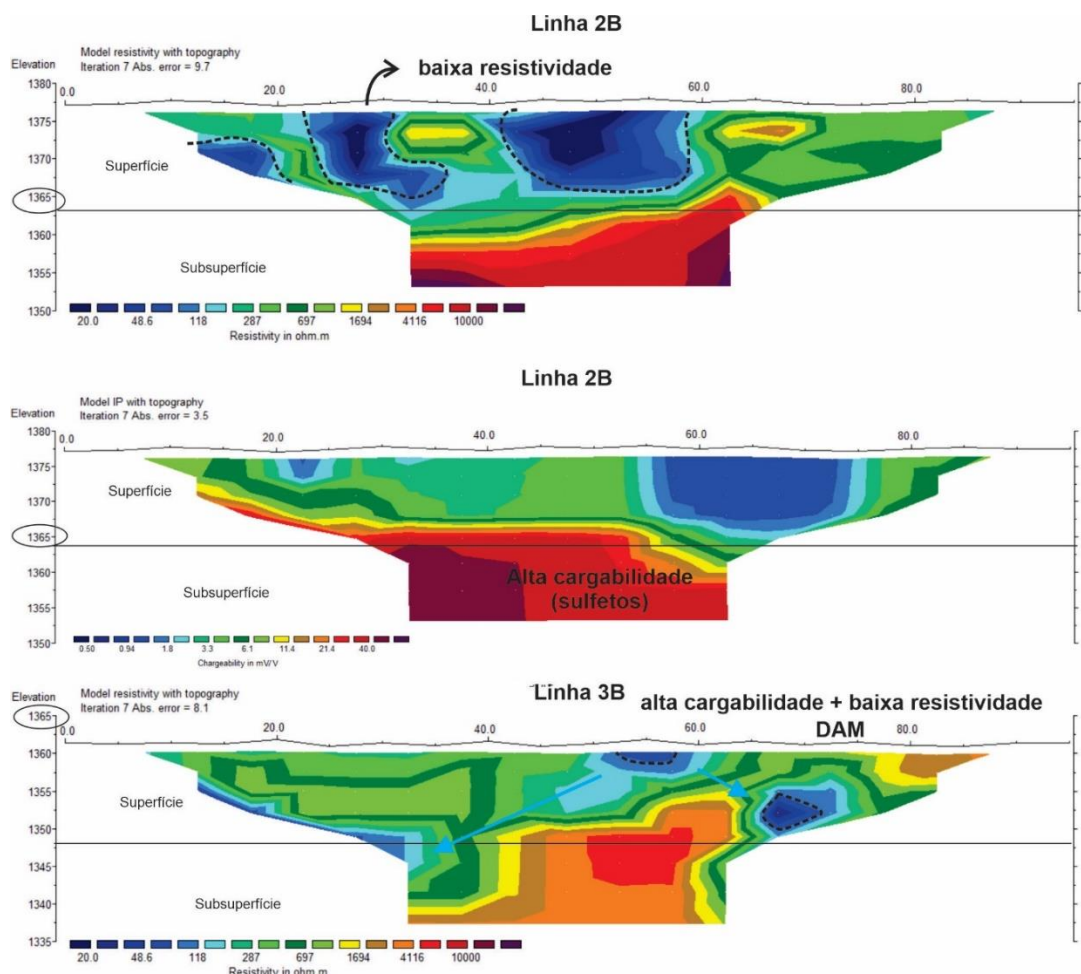
Diante dessa natureza, grandes bolsões de água são armazenados e acumulados no interior do maciço e, quando há fluxo lixiviam os minerais de superfície para profundidade, comprovados pela alta cargabilidade representada em profundidade na Linha 1 B (Figura 98). Em 1370 metros, próximo aos 30 metros da linha geofísica 2 B, o modelo de resistividade elétrica indicou valores próximos a 20 $\Omega.m$, que representa não somente a existência de água, como a presença de sais dissolvidos e caracteriza a percolação de água pelo maciço em profundidade e geração da drenagem ácida. A interação entre zonas de saturação do maciço com zonas de alta cargabilidade também é notória entre as linhas 2 e 3 B (Figura 99). Próximo a cota 1365 metros a ocorrência simultânea de presença de água e sulfetos, produz em 3 B zona de geração de drenagem ácida próxima a superfície. É notável a existência de outras zonas de acúmulo de água em maior profundidade, com resistividade inferior a 20 $\Omega.m$, como por exemplo próximo a 70 metros de extensão da linha e indica a possibilidade de fluxo, percolação e armazenamento de água na zona brechada (Figura 99).

Figura 98: Possível ponto de geração de drenagem ácida – Linhas 1 e 2B



Fonte: elaborado pelo autor

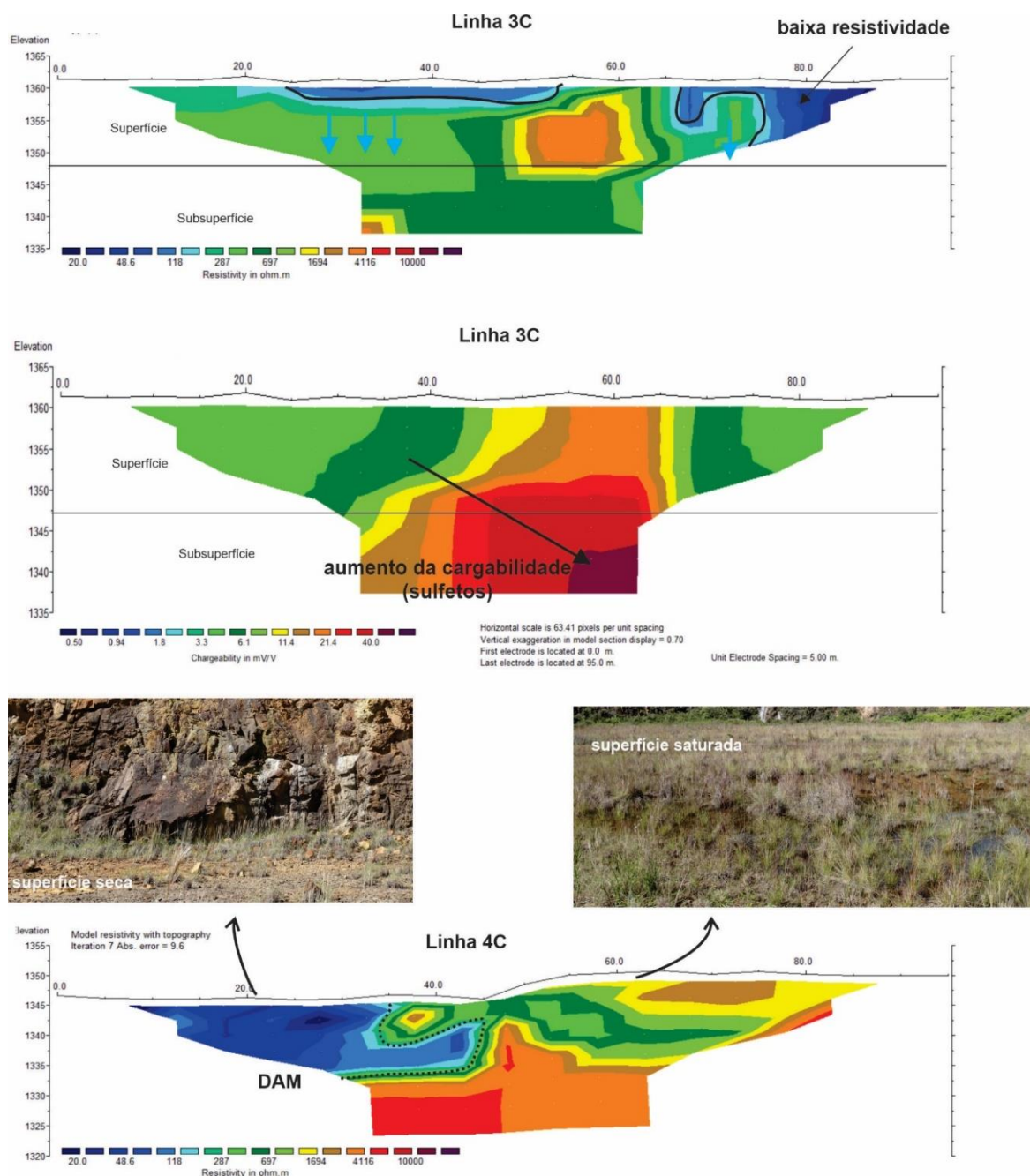
Figura 99: Possível ponto de geração de drenagem ácida – Linhas 2 e 3B



Fonte: elaborado pelo autor

O modelo gerado para o Setor C indicou camadas superficiais heterogêneas em 4C, com os primeiros metros totalmente saturado em subsuperfície e indicam material superficial poroso ou, pouco compactado e os 50 últimos metros com acúmulo de água na superfície, ou seja, rocha pouco fraturada que impede o fluxo de água em profundidade. Paralelo a resistividade, o modelo de cargabilidade na linha 3C segue a tendência dos setores anteriores e indicou, aumento da cargabilidade conforme o aumento da profundidade. Ainda na linha 3C, o modelo de resistividade apresentou concentração de água em superfície que percola em profundidade e pode atingir zonas de concentração de sulfetos, ou, de sulfetos disseminados (10 mV/V). Como resultado, a água presente em subsuperfície em 4C apresenta caráter ácido, com alta concentração de sais ($<20 \Omega.m$) (Figura 100).

Figura 100: Diferença dos materiais de superfície no setor C



Fonte: elaborado pelo autor

A análise dos poços de monitoramento presentes na frente SE da cava da mina Osamu Utsumi indicam a presença de pH ácido que varia entre 1,67 a 4,91, conforme representados na Tabela 21.

Tabela 21: Características dos poços de monitoramento da frente SE

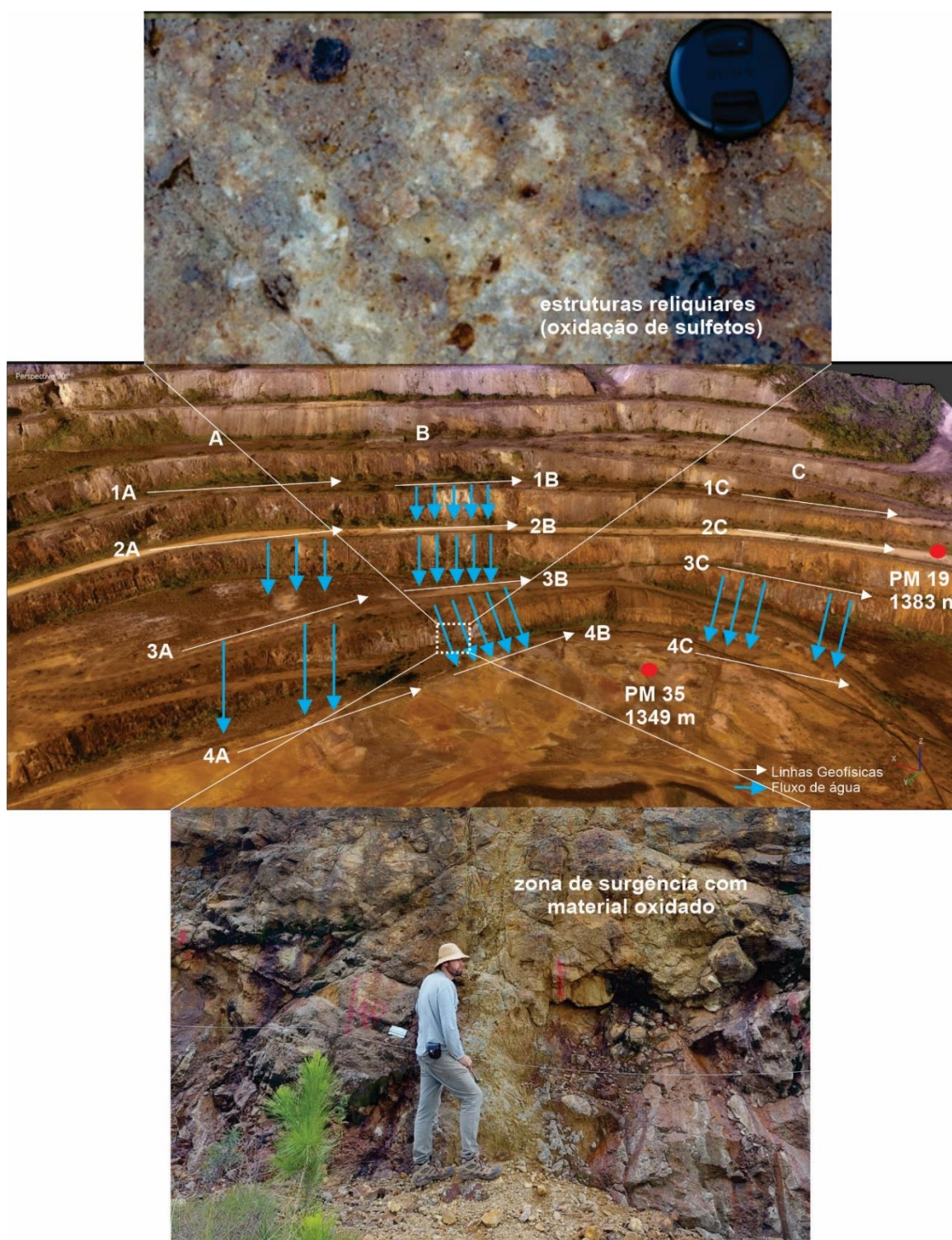
Poço	Cota de Topo (m)	Cota de fundo (m)	pH	K (mg/L)	SO ₄ (mg/L)
16	1366	1360	1,67	4,9	20,7
30	1366	1342	4,91	7,9	38,1
35	1349	1343	3,77	9,7	58,2
19	1383	1359	5,35	10,7	0

Fonte: elaborado pelo autor

De acordo com a resolução CONAMA nº357/2005 (Conselho Nacional do Meio Ambiente) o pH de águas caracterizadas como doces deve ser estabelecido entre 6 e 9, independentemente da sua classificação e uso (Brasil, 2005). Além disso, as águas subterrâneas apresentam valor médio entre 1 a 5 mg/L de potássio e conforme analisado, demonstra o processo de lixiviação dos minerais do maciço da cava da mina, uma vez que 3 dos 4 poços presentes na frente SE possuem concentração de potássio acima de 5 mg/L (Vaitsman, 2005). Os sulfatos, estão em conformidade com a legislação que estabelece valores máximos de 250 mg/L e dentro da média das concentrações encontradas em águas naturais (entre 2 a 80 mg/L).

O poço 35 é o mais próximo das linhas geofísicas estudadas e está localizado em cotas inferiores aos taludes analisados, ou seja, capta o fluxo de água advindo a montante dos setores A, B e C. Em comparação ao poço 19, localizado em bancada superior, é possível notar que o pH de 5,35 diminui para 3,77 e corrobora com o fluxo de drenagem ácida que escoar e percola pelo maciço em profundidade. A alta concentração de sais dissolvidos, como o potássio e o sulfato indicam que estes foram oxidados e depositados em profundidade, evidenciado em pontos da face exposta do talude (Figura 101). O Setor B, caracterizado principalmente pela litologia de brecha e consequentemente pela presença de zonas mineralizadas residuais, apresenta maiores fontes de geração de drenagem ácida que percolam pelo maciço e são captadas por poços a jusante que indicam pH ácido. O Setor A cuja litologia predominante é o foiaito possui menor expressividade na geração de drenagem ácida, pois os sulfetos estão disseminados no maciço e sua porosidade é inferior ao das brechas.

Figura 101: Representação do fluxo de água nos diferentes setores com destaque a surgência de água e ao processo de oxidação dos sulfetos.



Fonte: elaborado pelo autor

A alteração do nível freático e do fluxo de percolação de água na maciço diante do processo de abertura da mina, aliada a alta pluviosidade registrada anualmente na

cava (1.700 mm) e da litologia presente faz com que o processo de mitigação dos impactos ambientais e estabilização química e geotécnica do local sejam complexos.

O conhecimento litológico, geotécnico e estrutural da área da cava indicou condições favoráveis ao fluxo de água nas rochas de foiaito, saturação em zonas de brecha com existência de minério residual, com consequente suscetibilidade ao desenvolvimento de rupturas do tipo planar, em cunha e geração de drenagem ácida. Diante disso a maneira mais eficaz de controle de áreas instáveis bem como mitigação de zonas de geração de drenagem ácida é a combinação de duas operações, tais quais execução de obras de drenagem e retirada de minério residual.

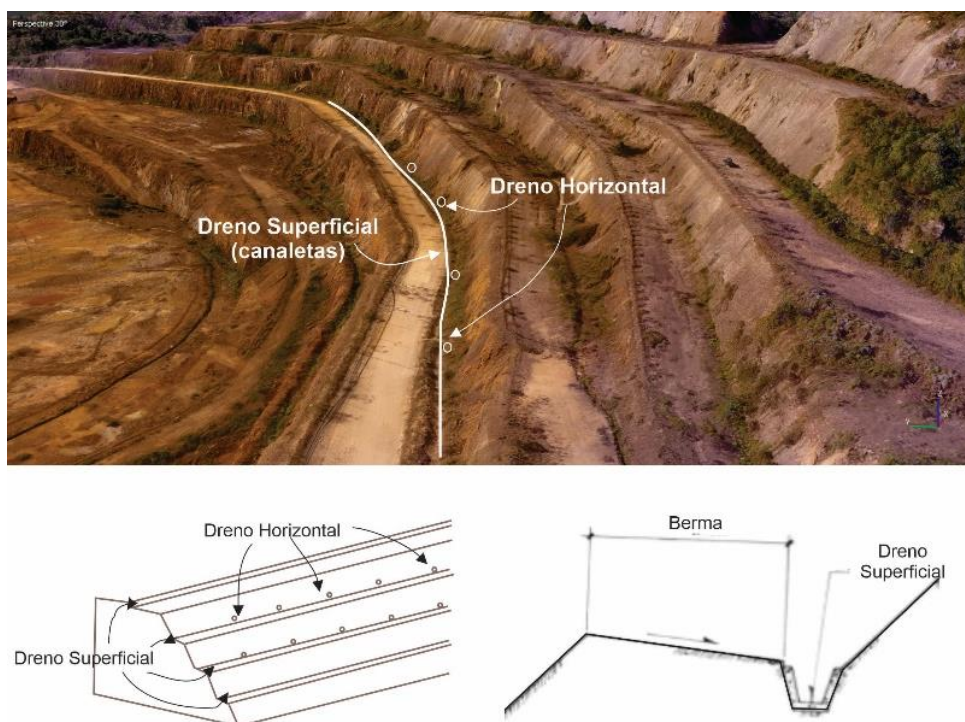
Uma das alternativas de diminuir a infiltração da água no maciço é através de técnicas de drenagem, comumente utilizadas em minerações a céu aberto (Figura 102). Essa técnica consiste na inserção de drenos superficiais instalados no pé do talude no sentido longitudinal das bermas com leve inclinação (0,5%), que condicionarão a água pluvial captada para fora da área da cava. Combinada a ela, inserção de drenos sub-horizontais profundos alocados em bermas em direção dos taludes onde já houve ou há ocorrência de fluxo de água. O principal objetivo do dreno sub-horizontal é reduzir a pressão neutra do maciço ao retirar a água do fluxo interno e conduzir ao dreno de superfície. Vários trabalhos descrevem o sucesso na execução de drenagem de mina como alternativa de minimizar eventos instabilizantes (Brawner, 1982; Mukhlisin *et al*, 2016; Argunhan-Atalay *et al*, 2021).

A execução de obras de drenagem superficiais e profundas única e exclusivamente acarretam apenas na captação e direcionamento da água ácida para posterior tratamento com agentes redutores, realizados nas águas captadas das pilhas de estéril (do Nascimento, 2022). Esse processo embora eficaz é oneroso e não soluciona o problema, uma vez que não elimina a fonte geradora.

No caso da cava da mina as zonas de minério residual são bem delimitadas pela litologia brechoide e identificáveis pelos métodos de investigação em subsuperfície. A reconformação da cava da mina com a retirada das zonas mineralizadas constitui um dos métodos de mitigação da geração da drenagem ácida (Skousen e Larew, 1994; Faulkner e Skousen, 1994; Skpousen *et al.*, 1998). Na área de estudos a utilização de sistemas de drenagem adensados principalmente no setor B, minimizaria a infiltração de água no maciço e consequentemente a interação desta com litologias do tipo brechoide. Desse modo, a instabilidade dos taludes seria reduzida e as características físico-químicas das águas captadas pelos poços

poderiam atingir níveis aceitáveis pela legislação e assim auxiliar no efetivo processo de descomissionamento.

Figura 102: Esquematização de drenagem em cava de mina



Fonte: elaborado pelo autor

Outras técnicas como de *backfill*, citada anteriormente e realizada com êxito na Alemanha, seriam inviáveis para a cava da Mina Osamu Utsumi. Embora seja uma técnica muito utilizada recentemente, ela requer planejamento prévio de sua execução durante a vida produtiva da mina (Villain *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2021). A Mina Osamu Utsumi não gera mais rejeitos e estéréis desde o encerramento de sua produção em 1995 e suas pilhas de estéril estão consolidadas e revegetadas. A transposição das pilhas para o interior da cava geraria maior custo e haveria necessidade de deslocamento de maquinários para a execução do *backfill*. Novos estudos sobre a disposição deste estéril deveriam ser realizados com a finalidade de evitar a segregação granulométrica do material e consequentemente afetar a condição de estabilidade geotécnica da cava.

9 CONCLUSÕES

O encerramento das atividades de um empreendimento mineiro deve ser projetado antes mesmo de sua abertura, uma vez que esse processo é oneroso e deve ser executado com planejamento para redução de impactos ambientais. A Mina Osamu Utsumi foi implementada sem o planejamento efetivo e com isso, seu processo de descomissionamento é complexo diante do seu histórico. Um dos principais pontos a serem considerados no processo de descomissionamento é assegurar a estabilidade geotécnica, além da qualidade das águas subterrâneas, principalmente devido a existência de materiais reativos em pilhas de estéril e no interior da cava da mina.

As análises geotécnicas consistem principalmente na realização de inspeções visuais ao longo da face dos taludes, para observar indícios de surgência de água, bem como na obtenção de variáveis estáticas relacionadas a parâmetros estruturais e litológicos. A estabilidade de um talude, no entanto, pode estar comprometida mesmo em casos onde não há surgência de água. Isso ocorre quando a rocha absorve e acumula água em fraturas e poros que provoca o aumento da poropressão e consequente risco de ruptura.

As tradicionais inspeções geotécnicas aliadas a parâmetros estáticos do maciço apresentam resultados insatisfatórios para a avaliação da estabilidade dos taludes. É recomendado o uso de outras técnicas para que seja avaliada a existência de zonas de acúmulo de água no interior do maciço. O uso de métodos geofísicos possibilita amplo diagnóstico do grau de saturação em maciços rochosos, algo que auxilia no entendimento do comportamento geotécnico e na elaboração de modelos de previsão de estabilidade dos taludes, de forma a combinar parâmetros estáticos e dinâmicos.

Os dados geológicos, geotécnicos e estruturais, de características predominantemente estáticas indicaram que todos os setores da Frente SE apresentam risco de ruptura do tipo planar ou em cunha. No entanto, apesar de mesmo no período mais chuvoso não haver indícios de surgência de água na face, o Setor A apresenta rupturas expressivas em sua extensão. A análise geofísica indica zonas de menor resistividade coincidentes com litologias menos resistentes e menos

permeáveis, portanto com acúmulo de água e indução de poropressão em longos períodos de saturação e maior risco de ruptura.

No Setor B, as características de alteração e tendência de predomínio de porosidade em relação ao grau de fraturamento resulta no maior acúmulo de água e surgências visíveis na face do talude, como consequência a maior propensão a rupturas. Essas características tornam o Setor B o mais crítico dentre todos. Contudo, a inspeção geotécnica em períodos de estiagem e, portanto, de ausência de surgências, será uma ferramenta limitada no diagnóstico de zonas mais instáveis e propensas a rupturas.

O Setor C apresenta integridade e resistência, mas rocha extremamente fraturada, com valores de resistividade intermediários. Essas características são responsáveis pela ausência de rupturas.

Os resultados geofísicos indicaram zonas insaturadas e saturadas que no contexto de período chuvoso em rocha fraturada, é indicador de grau de fraturamento. As ferramentas geotécnicas são incapazes de produzir essa informação. Portanto, o uso combinado dos métodos pode tanto esclarecer os mecanismos de ruptura em regiões com esse diagnóstico quanto o reconhecimento de zonas com potencial de rupturas. Um elemento específico da área de estudos é a existência de minério residual, algo possível em minerações, mas ausente em taludes de rodovias. Na área de estudos, a zona de minério residual apresenta na face do talude elevado grau de alteração e predomínio de fluxo em sistema poroso, embora originalmente seja uma rocha fraturada. Essa rocha possui uma assembleia de minerais dos quais os sulfetos são os mais reativos. Em presença de água são rapidamente destruídos e convertidos em sulfato solúvel e impregnações de óxidos metálicos. Este processo explica a existência de drenagem ácida de mina e o elevado teor de sulfato nos poços de monitoramento. As características de baixo pH deste efluente podem acelerar processos de intemperismo e dissolução em planos de fratura e, em certa medida, induzir processos de ruptura.

Diante do exposto, a recomendação principal é a extinção de zonas de acúmulo de água no maciço, seja pela instalação de drenos, redução dos pontos de infiltração por meio de um sistema de drenagem de águas pluviais mais eficiente, e em último caso, retaludamento de faces de taludes mais instáveis. No caso específico da área de estudos é recomendado a remoção do volume de minério residual diante de precárias características de estabilidade geotécnica, e de representar uma fonte

permanente de geração de drenagem ácida de mina, com consequente impacto no aquífero local, conforme demonstrado nos dados hidroquímicos.

Por fim, o conjunto de técnicas empregadas no diagnóstico de maciço rochoso na área de estudos permitiu um diagnóstico estrutural e hidrogeológico abrangente e eficiente para compreensão de fenômenos relacionados a instabilidade geotécnica. Condições semelhantes em taludes de rodovia, dutovias ou em obras de terraplanagem também são alvos de instabilidade geotécnica pelo conjunto de parâmetros estáticos e dinâmicos avaliados neste trabalho. Em semelhança, é recomendável a análise conjunta por meio de geofísica e geotecnia na compreensão e previsibilidade na tomada de decisões em projetos de mineração ou obras civis.

REFERÊNCIAS

- ABDELGHANI, Farouk Ben et al. Numerical simulations of water flow and contaminants transport near mining wastes disposed in a fractured rock mass. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 25, n. 1, p. 37-45, 2015.
- ABEM. Terrameter LS – Instruction manual. ABEM Instrument AB, Sundbyberg, p.122, 2012.
- ABNT- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 11682**, 2009,-Estabilidade de Encostas.
- ADAMS, R.; YOUNGER, P. L. A strategy for modeling ground water rebound in abandoned deep mine systems. **Groundwater**, v. 39, n. 2, p. 249-261, 2001.
- ADDIS, M. A. et al. Laboratory studies on the stability of vertical and deviated boreholes. In: **SPE annual technical conference and exhibition**. OnePetro, 1990.
- ADEPELUMI, A. A.; FAYEMI, O.; AKINDULURENI, J. Geophysical mapping of subsurface stratigraphy beneath a river bed using ground penetrating radar: Lagos Nigeria case study. **Universal Journal of Geoscience**, v. 1, n. 1, p. 10-19, 2013.
- AKCIL, Ata; KOLDAS, Soner. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. **Journal of cleaner production**, v. 14, n. 12-13, p. 1139-1145, 2006.
- ALLRED, Barry J. et al. GPR detection of drainage pipes in farmlands. In: **Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar, 2004. GPR 2004**. IEEE, 2004. p. 307-310.
- ANM – Agência Nacional de Mineração. **Resolução nº 68 de 30 de abril de 2021**. Plano de Fechamento de Mina.
- ANNAN, A. P. GPR—History, trends, and future developments. **Subsurface sensing technologies and applications**, v. 3, n. 4, p. 253-270, 2002.
- ARANHA, Paulo Roberto Antunes et al. Aplicação do GPR na análise da estabilidade de taludes na região metropolitana de Belo Horizonte, MG. 2005.
- ARDEJANI, F. et al. A finite element model to: 1. Predict groundwater inflow to surface mining excavations. **Mine Water and the Environment**, v. 22, p. 31-38, 2003.
- ARGUNHAN-ATALAY, Cidem; YAZICIGIL, Hasan; EKMEKCI, Mehmet. Assessment of performance of horizontal drains in an open pit mine in eastern Turkey. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, p. 1-16, 2021.

ARYAFAR, Ahmad et al. Prediction of groundwater inflow and height of the seepage face in a deep open pit mine using numerical finite element model and analytical solutions. In: **IMWA Symposium**. 2007. p. e31st.

AUNG, Myint; TIN, Aung Lay. Effective environmental management system of acid mine drainage at Kyisintaung copper surface mine in Myanmar. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2020. p. 012052.

AUSTRALIA. Department of Industry Torism and Resources. Mine closure and completion. Canberra, 2006

AYORA, Carlos et al. Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt: 2. Lessons learned from recent passive remediation experiences. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, p. 7837-7853, 2013.

BAINTON, Nicholas; HOLCOMBE, Sarah. A critical review of the social aspects of mine closure. **Resources Policy**, v. 59, p. 468-478, 2018.

BARROS, Claudia Affonso et al. **Métodos para tratamento biológico de drenagem ácida de mina-DAM**. 2012.

Barton N (1973) Review of a new shear-strength criterion for rock joints. **Eng Geol** 7(4):287–332

BARTON, Nick. **Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy**. CRC press, 2006.

BARTON, Nick; BAR, Neil. Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. In: **ISRM Regional Symposium-EUROCK 2015**. OnePetro, 2015.

BARTON, Nick; CHOUBEY, Vishnu. The shear strength of rock joints in theory and practice. **Rock mechanics**, v. 10, p. 1-54, 1977.

BELL, F. G.; ENTWISLE, D. C.; CULSHAW, M. G. A geotechnical survey of some British Coal Measures mudstones, with particular emphasis on durability. **Engineering Geology**, v. 46, n. 2, p. 115-129, 1997.

BLEWITT, John. The Eden Project–making a connection. **museum and society**, v. 2, n. 3, p. 175-189, 2004.

BOIERO, Daniele et al. Geophysical investigation of a mineral groundwater resource in Turkey. **Hydrogeology journal**, v. 18, n. 5, p. 1219, 2010.

Borma, L. D. S., & Soares, P. S. M. (2002). **Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração**. CETEM/MCT.

BOTTA, N. A.; MCFAUL, S.; XAVIER, A. Economic diversification and mine closure: An analysis of the Misima Mine case. **PROCEEDINGS MINE CLOSURE SOLUTION**, v. 2014, 2014.

BRAWNER, C. O. Control of groundwater in surface mining. **International journal of mine water**, v. 1, n. 1, p. 1-16, 1982.

BRISTOW, Charlie S.; JOL, Harry M. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 211, n. 1, p. 1-7, 2003.

CAŁA, Marek et al. The Challenges of Open-Pit Mining in the Vicinity of the Salt Dome (Bełchatów Lignite Deposit, Poland). **Energies**, v. 13, n. 8, p. 1913, 2020.

CALDWELL, J. The Bingham Canyon Mine Slope Failure. **site [www. mining. com](http://www.mining.com)**, published in April 15th, 2013.

CAMARERO, Pedro Lemos; MOREIRA, Cesar Augusto. Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity technique. **REM-International Engineering Journal**, v. 70, p. 47-52, 2017.

CAMPANER, Veridiana Polvani; LUIZ-SILVA, Wanilson. Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil. **Química Nova**, v. 32, p. 146-152, 2009.

CAPOVILLA, Maria Manuela Galvão Monteiro. **Urânio nos hidrotermalitos potássicos (rocha potássica) da mina Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CARMIGNANI, L.; FIORI, A. P. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. **Curitiba: Editora UFPR, 604pp**, 2009.

CASAGRANDE, Matheus Felipe Stanfoca et al. Integration of geophysical methods in the study of acid drainage in uranium mining waste. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 36, n. 4, p. 439-450, 2018.

CASTRO, Maíra Fonseca Moreira; DE LIMA, Hernani Mota; DO CARMO FLÔRES, José Cruz. Panorama do fechamento de mina em Minas Gerais, Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 2, 2011.

ČERU, Teja et al. Detecting and characterizing unroofed caves by ground penetrating radar. **Geomorphology**, v. 303, p. 524-539, 2018.

CETEM/MCT, **Projeto Conceitual para a Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense**, RT33/2000, RT45/200, RT46/200 - Relatório Técnico Elaborado para SIECESC Volume 1, 2 e 3, 2001

CHAMBERLAIN, Andrew T. et al. Cave detection in limestone using ground penetrating radar. **Journal of Archaeological Science**, v. 27, n. 10, p. 957-964, 2000.

CIPRIANI, Moacir. **Mitigation of social and environmental impacts resulting from final closure of uranium mines**; Mitigação dos impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio. 2002.

CLARK, A. L.; CLARK, J. C. VIII. An International Overview of Legal Frameworks for Mine Closure. **Environmental Law Alliance Worldwide: Eugene, OR, USA**, 2005.

CLARK, Allen L.; NAITO, Koh; CLARK, Jennifer Cook. **Legal framework for mine closure**. 2000.

COSTA, P. C. G.; DELGADO, S. L.; CARMOS, J. C. C. *Projeto hidrogeoambiental das estâncias hidrominerais da companhia mineradora de Minas Gerais (COMIG)*. **Relatório Técnico** COMIG/Fundação Gorceix. 69 p. 1998.

COSTA, Teófilo Aquino Vieira da. **Caracterização geológico-geotécnica e modos de ruptura do minério hematítico friável nas minas da Vale, Borda Oeste do Quadrilátero Ferrífero-MG**. 2009.

COWAN, W. R.; MACKASEY, W. O.; ROBERTSON, John GA. The policy framework in Canada for mine closure and management of long-term liabilities: a guidance document. **Prepared for the National Orphaned/Abandoned Mines Initiative. Cowan Minerals Ltd., Sudbury, Ontario**, 2010.

DA CRUZ, W. B.; PEIXOTO, CAdM. As águas termais de Poços de Caldas, MG- Estudo experimental das interações água-rocha. **Revista brasileira de geociências**, v. 19, n. 1, p. 76-86, 1989.

DAVID, Carlos Primo C. Establishing the impact of acid mine drainage through metal bioaccumulation and taxa richness of benthic insects in a tropical Asian stream (The Philippines). **Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal**, v. 22, n. 12, p. 2952-2959, 2003.

DAVIS, John L.; ANNAN, A. Peter. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy 1. **Geophysical prospecting**, v. 37, n. 5, p. 531-551, 1989.

DI GIORGIO, Daniele et al. Análise estrutural no planejamento de lavra de rocha ornamental. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, p. 174-179, 2003.

DIAS, Jardel Carvalho. **Avaliação do fechamento de mina a partir dos processos minerários da Superintendência do DNPM de Minas Gerais**. 2013.

DIAS, Leandro Pinheiro. Plano de Fechamento de Mina: Alternativas para reutilização da área impactada. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 371-394, 2016.

DO NASCIMENTO, Gleide Alencar; SILVA, Adrianna Jakeline. Estudo da estabilidade de taludes em Petropolis (RJ) através dos métodos geofísicos GPR e ERT: STUDY OF SLOPE STABILITY. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 2, p. 156-171, 2022.

DO NASCIMENTO, Matheus Mistrinel Pacine Feitoza et al. Geophysical diagnosis of diversion channel infiltration in a uranium waste rock pile. **Mine Water and the Environment**, v. 41, n. 3, p. 704-720, 2022.

EBONG, Ebong D. et al. 2D electrical resistivity inversion and ground penetrating radar investigation of near surface cave in New Netim area, southeastern Nigeria. **Acta Geodaetica et Geophysica**, v. 56, p. 765-780, 2021.

ELIZONDO, Martha Angélica et al. Application of the Wigner-Ville distribution to interpret ground-penetrating radar anomalies. **Geofísica internacional**, v. 51, n. 2, p. 121-127, 2012.

ELLERT, Reinholt. Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia**, n. 18, p. 5-60, 1959.

EQUEENUDDIN, Sk Md et al. Metal behavior in sediment associated with acid mine drainage stream: role of pH. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 124, p. 230-237, 2013.

EUA. A Threatening Legacy: Tens of thousands of abandoned mine lands pose serious risks to our environment and our health. Abandoned Mines.gov, 2017

FAGUNDES, Júnio René Toledo. **Balanço hídrico do bota-fora BF4 da mina Osamu Utsumi, INB, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida**. 2005.

FARFAN, J. R. J.; BARBOSA FILHO, Olavo; SOUZA, Vicente Paulo de. **Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral**. CETEM, 2004.

FARIA, Sandro Henrique de et al. Avaliação de radargramas batimétricos para cálculo de volume de represa empregando o classificador "FCLASS2". **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, p. 234-251, 2017.

FAULKNER, Ben B.; SKOUSEN, Jeff G. Treatment of acid mine drainage by passive treatment systems. In: **Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference, April 24–29, 1994, US Bureau of Mines SP 06A**. 1994. p. 250-257.

FERNANDES, C. E. M. **Fundamentos de prospecção geofísica**. Rio de Janeiro: Interciência, 1984. 190p

FLEURISSON, Jean-Alain. Slope design and implementation in open pit mines: geological and geomechanical approach. **Procedia Engineering**, v. 46, p. 27-38, 2012.

FLÔRES, JC do C. Fechamento de mina: aspectos técnicos, jurídicos e sócio-econômicos. **Campinas: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas**, 2006.

FOURIE, A.; BRENT, Alan Colin. A project-based mine closure model (MCM) for sustainable asset life cycle management. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 12-13, p. 1085-1095, 2006.

FRAENKEL, M. O. et al. Jazida de urânio no planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais. In: **Principais depósitos minerais do Brasil**. 1985. p. 89-103.

FRANCA, P. R. Decommissioning of the Águas Claras Mine. In: **Internacional Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Nova deli, India**. 2001.

FRANKLIN, M. R. Modelagem numérica do escoamento hidrológico e dos processos geoquímicos aplicados à previsão da drenagem ácida em uma pilha de estéril da mina de urânio de Poços de Caldas–MG. **UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de doutor em ciências em engenharia civil, Rio de Janeiro**, 2007.

FRANKLIN, Mariza Ramalho; FERNANDES, Horst Monken. Identifying and overcoming the constraints that prevent the full implementation of decommissioning and remediation programs in uranium mining sites. **Journal of environmental radioactivity**, v. 119, p. 48-54, 2013.

FREITAS, Ruy Ozorio. Ensaio sobre a tectônica moderna do Brasil. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia**, n. 6, p. 7-107, 1951.

FRIEDEL, S.; THIELEN, A.; SPRINGMAN, Sarah M. Investigation of a slope endangered by rainfall-induced landslides using 3D resistivity tomography and geotechnical testing. **Journal of Applied Geophysics**, v. 60, n. 2, p. 100-114, 2006.

GADALLAH, Mamdouh R.; FISHER, Ray. **Exploration geophysics**. Springer Science & Business Media, 2008.

GALATTO, Sérgio Luciano et al. Emprego de coberturas secas no controle da drenagem ácida de mina: estudos em campo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, p. 229-236, 2007.

GARDA, Gianna Maria. **Alteração Hidrotermal no contexto da evolução geológica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP**. 1990. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GASTMAIER MARQUES, Anna Carolina et al. Gamma-ray spectrometry applied in the identification of potential acid mine drainage generation zones in waste rock pile with uranium ore and associated sulfides (Caldas, Brazil). **Geofísica internacional**, v. 61, n. 3, p. 251-266, 2022.

GETTY, Rebecca; MORRISON-SAUNDERS, Angus. Evaluating the effectiveness of integrating the environmental impact assessment and mine closure planning processes. **Environmental impact assessment review**, v. 82, p. 106366, 2020.

GÖKCEOĞLU, Candan; ULUSAY, Resat; SÖNMEZ, Harun. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. **Engineering Geology**, v. 57, n. 3-4, p. 215-237, 2000.

GOLDER ASSOCIATES. *Plano de Recuperação de Áreas Degradadas – INB UTM Caldas*. Technical Report, Belo Horizonte, 2012.

GOODMAN, Dean et al. GPR image construction and image processing. **GPR remote sensing in archaeology**, p. 63-100, 2013.

GOODMAN, Dean et al. **GPR remote sensing in archaeology**. New York: Springer, 2013.

GOODMAN, Richard E. *Introduction to Rock Mechanics* John Wiley & Sons, New York. 1989.

GRASMUECK, Mark; GREEN, Alan G. 3-D georadar mapping: Looking into the subsurface. **Environmental & Engineering Geoscience**, v. 2, n. 2, p. 195-200, 1996.

GRAY, N. F. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. **Environmental geology**, v. 30, p. 62-71, 1997.

GREER, Breeyn M. et al. Electrical resistivity imaging of hydrologic flow through surface coal mine valley fills with comparison to other landforms. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 12, p. 2244-2260, 2017.

GRODNER, M. Delineation of rockburst fractures with ground penetrating radar in the Witwatersrand Basin, South Africa. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 38, n. 6, p. 885-891, 2001.

GUO, Zhiqi et al. A shale rock physics model for analysis of brittleness index, mineralogy and porosity in the Barnett Shale. **Journal of Geophysics and Engineering**, v. 10, n. 2, p. 025006, 2013.

HACK, Robert. Geophysics for slope stability. **Surveys in geophysics**, v. 21, n. 4, p. 423-448, 2000.

HAGEN, M.; JAKUBICK, A. T.; PAUL, M. Status and results of the WISMUT environmental remediation project. **Recent developments in uranium exploration, production and environmental issues**, p. 21, 2005.

HALCOMB M, Fare D Soil pH explained. Agricultural Extension Service, The University of Tennessee; 2002. Disponível em: <http://www.utextension.utk>.

HAMDAN, Hamdan et al. Contribution of electrical tomography methods in geotechnical investigations at Mavropigi lignite open pit mine, Northern Greece. **Environmental earth sciences**, v. 72, p. 1589-1598, 2014.

HARTMAN, Howard L.; MUTMANSKY, Jan M. **Introductory mining engineering**. John Wiley & Sons, 2002.

HEIKKINEN, Päivi et al. **Mine Closure Handbook: Environmental Techniques for the Extractive Industry**. Geological Survey of Finland, 2008.

HESTER, Erich T. et al. Variability of subsurface structure and infiltration hydrology among surface coal mine valley fills. **Science of the total environment**, v. 651, p. 2648-2661, 2019.

HOEK, Evert; BRAY, Jonathan D. **Rock slope engineering**. CRC press, 1981.

HOLMES, D. C.; PITY, A. E.; NOY, D. J. Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera analogue study sites. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 45, n. 1-3, p. 215-247, 1992.

HUDSON, J. A.; PRIEST, S. D. Discontinuity frequency in rock masses. In: **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Pergamon, 1983. p. 73-89.

HÜLSMEYER C. 1904. **Patent 165546**. Deutschland.

HVORSLEV, Mikael Juul. **Time lag and soil permeability in ground-water observations**. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, US Army, 1951.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Manual de Recuperação pelas Áreas Degradadas pela Mineração: técnicas de revegetação**. Brasília: 1990.

IGAM –Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Plano Diretor de Recursos Hídricos dos Afluentes Mineiros dos rios Mogi-Guaçu/Pardo**.2009.

ISRM (1978) International society for rock mechanics. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 15:99–103

JACKSON, Richard T. Capacity building in Papua New Guinea for community maintenance during and after mine closure. **Report commissioned by the Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD) project of the International Institute for Environment and Development (IIED)**, n. 181, 2002.

JANOCHA, Julian et al. Seeing beyond the outcrop: Integration of ground-penetrating radar with digital outcrop models of a paleokarst system. **Marine and Petroleum Geology**, v. 125, p. 104833, 2021.

JOHNSON, D. Barrie; HALLBERG, Kevin B. Acid mine drainage remediation options: a review. **Science of the total environment**, v. 338, n. 1-2, p. 3-14, 2005.

KABIR, SM Zobaidul et al. A review of mine closure planning and practice in Canada and Australia. **World Review of Business Research**, v. 5, n. 3, p. 140-159, 2015.

KARAM, K.; HE, MANCHAO; SOUSA, L. R. Slope stability risk management in open pit mines. **Int Geoinf Res Developm J**, v. 7, n. 4, p. 1-17, 2016.

KARAMZADEH, Saeid et al. Frequency Independent Self Complementary Bow Tie Antenna Design for GPR Applications. **Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering**, v. 18, n. 1, p. 131-138, 2017.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **An introduction to geophysical exploration**. John Wiley & Sons, 2002.

KELLY, T. B. et al. A novel approach to 3D modelling ground-penetrating radar (GPR) data—a case study of a cemetery and applications for criminal investigation. **Forensic Science International**, v. 325, p. 110882, 2021.

KELLY, William E.; MAREŠ, Stanislav (Ed.). **Applied geophysics in hydrogeological and engineering practice**. Elsevier, 1993.

KNEBEL, K.; SANCHEZ, J.; ZIMMERMANN, S. The Eden Project- Design, fabrication and assembly of the largest greenhouse of the world. **Stahlbau**, v. 70, n. 8, p. 513-525, 2001.

KNÖDEL, Klaus et al. Ground penetrating radar. **Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies**, p. 283-335, 2007.

KOIDE, Ryu et al. A model for prediction of neutralizer usage and sludge generation in the treatment of acid mine drainage from abandoned mines: Case studies in Japan. **Mine Water and the Environment**, v. 31, n. 4, p. 287, 2012.

KUKKONEN, I. T.; KIVEKÄS, L.; PAANANEN, M. Physical properties of kárnäite (impact melt), suevite and impact breccia in the Lappajärvi meteorite crater, Finland. **Tectonophysics**, v. 216, n. 1-2, p. 111-122, 1992.

KUMSAR, Halil; AYDAN, Ö.; ULUSAY, R. Dynamic and static stability assessment of rock slopes against wedge failures. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 33, p. 31-51, 2000.

LAURENCE, David. Optimisation of the mine closure process. **Journal of cleaner production**, v. 14, n. 3-4, p. 285-298, 2006.

Leimbach, G. und Löwy, H. Verfahren zur systematischen Erforschung des Erdinneren größerer Gebiete mittels elektrischer Wellen. Deutsches **Patent** , Nr. **237944**, 15. Juni 1910

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

LOWRIE, William. Fundamentals of Geophysics: 5 geomagnetism and paleomagnetism. **Cambridge**,, 2007.

LUNT, I. A.; HUBBARD, S. S.; RUBIN, Y. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. **Journal of hydrology**, v. 307, n. 1-4, p. 254-269, 2005.

MA, Dan et al. Reutilization of gangue wastes in underground backfilling mining: overburden aquifer protection. **Chemosphere**, v. 264, p. 128400, 2021.

MACÊDO, Alexandre José Buril de; BAZANTE, Arlindo José; BONATES, Eduardo Jorge Lira. Seleção do método de lavra: arte e ciência. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 54, p. 221-225, 2001.

MAGNO JÚNIOR, L. B.. Osamu Utsumi Mine, Geologic Presentation. In: Relatório interno NUCLEBRÁS. Rio de Janeiro, RJ, 1985

MAIA, JOSÉ AC. **Métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes e cavidades em rocha**. Orientador: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, Ph. D, 2003.

MANDZIC, H. Mine water risk in open pit slope stability. **Mine water and the Environment**, v. 11, n. 4, p. 35-42, 1992.

MARIA, R. Summary Of Safety Criteria In Design. **Automotive Engineering Research Group (AERG)**, v. 10, p. 23-37, 2016.

MARQUES, E. A. G. et al. Weathering zones on metamorphic rocks from Rio de Janeiro—Physical, mineralogical and geomechanical characterization. **Engineering Geology**, v. 111, n. 1-4, p. 1-18, 2010.

MENEZES, Carlyle Torres Bezerra de et al. Tratamento de drenagem ácida de mina: Experiência da Carbonífera Metropolitana. **Anais: XX ENTMME**, 2004.

MENEZES, Danielle Aparecida de; CARNEIRO, Samuel Ricardo Carvalho; MEIRELES, Bruno Prado. Map of the potential geotechnical susceptibility for operational pit slopes. **REM-International Engineering Journal**, v. 72, p. 55-61, 2019.

MICKUS, Kevin. Geophysical methods. In: **Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering**. Butterworth-Heinemann, 2021. p. 199-287.

MIEKELEY, N. et al. Chemical and physical characterization of suspended particles and colloids in waters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 45, n. 1-3, p. 409-437, 1992.

MILSOM, John. **Field geophysics**. John Wiley and Sons, 2003.

MILSOM, John; ERIKSEN, Asger. **Field geophysics**. 2013.

MME – Ministério de Minas e Energia. 2021. Geologia, Mineração e Transformação Mineral, MME, Brasília. <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pagina-inicial>

MONTES-LAUAR, Célia Regina et al. Late Cretaceous alkaline complexes, southeastern Brazil: paleomagnetism and geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 134, n. 3-4, p. 425-440, 1995.

MOOSAVI, E.; SHIRINABADI, R.; GHOLINEJAD, M. Prediction of seepage water pressure for slope stability at the Gol-E-Gohar open pit mine. **Journal of Mining Science**, v. 52, p. 1069-1079, 2016.

MORAES, F. T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Fisiografia da região do planalto de Poços de Caldas, MG/SP. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 1, p. 196-208, 2008.

MORAES, Natália Cristiane de. **Abatimento de drenagem ácida de mina com cobertura de entulho de construção civil: uma proposta de reabilitação de uma antiga mina de pirita.** 2010.

MOREIRA, Cesar Augusto et al. Hydrogeological characterization of a waste rock pile and bedrock affected by acid mine drainage from geophysical survey. **SN Applied Sciences**, v. 2, p. 1-12, 2020.

MOREIRA, César Augusto; MONTENEGRO LAPOLA, Marcelo; CARRARA, Alan. Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer. **Geofísica internacional**, v. 55, n. 2, p. 119-129, 2016.

MOURA, Helyelson Paredes; MALAGUTTI FILHO, Walter. Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro-SP. **Geociências**, v. 22, n. Esp, p. 129-139, 2003.

MOUTINHO, Leandro; PORSANI, Jorge Luís; PORSANI, Milton José. Deconvolução preditiva de dados GPR adquiridos sobre lâmina d'água: exemplo do Rio Taquari, Pantanal Matogrossense. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, p. 61-74, 2005.

MUDDER, T.; HARVEY, K. Closure concepts. *Mining Environmental Management*, v. 6, n. 6, p. 8-10, 1998

MUKHLISIN, Muhammad; AZIZ, Nurul Aini Binti Abd. Study of horizontal drain effect on slope stability. **Journal of the Geological Society of India**, v. 87, n. 4, p. 483-490, 2016.

MURTA, F. C. **Ensaio de Coluna para a Avaliação Passiva de Drenagem Ácida na Mina de Osamu Utsumi (INB), Caldas/MG.** 2006. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, 127p, Ouro Preto-MG.

MUSSETT, Alan E.; KHAN, M. Aftab. **Looking into the earth: an introduction to geological geophysics.** Cambridge University Press, 2000.

NAMAGHI, Hadi; LI, Sheng; JIANG, Ligu. Numerical simulation of water flow in a large waste rock pile, Haizhou coal mine, China. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 1, p. 1-10, 2015.

NERI, Ana Claudia. **Tratamento de incertezas no planejamento do fechamento de mina.** 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NÓBREGA, Flávia Andrade; LIMA, Hernani Mota de; LEITE, Adilson do Lago. Análise de múltiplas variáveis no fechamento de mina: estudo de caso da pilha de estéril BF-

4, Mina Osamu Utsumi, INB Caldas, Minas Gerais. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 61, p. 197-202, 2008.

OLIVEIRA JÚNIOR, José Baptista de. **Desativação de empreendimentos mineiros: estratégias para diminuir o passivo ambiental**. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, A. P. **Estimativa Simultânea de Parâmetros Hidráulicos e de Transporte em Estéreis de Mineração de Urânio**. 2010, 186p. 2010. Tese de Doutorado. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas.

ORTEGA-RAMÍREZ, J. et al. Application of non-invasive geophysical methods (GPR and ERT) to locate the ancient foundations of the first cathedral of Puebla, Mexico. A case study. **Journal of Applied Geophysics**, v. 174, p. 103958, 2020.

OSINOWO, Olawale Olakunle; ELEBUTE, Quam Ademola. Ground Penetrating Radar (GPR) Investigation of Queen Sheba (Bilikisu Sungbo) Possible Burial Site in Oke-Eri, Ijebu-Ode, Southwestern Nigeria. **Geofísica Internacional**, v. 62, n. 1, p. 377-385, 2023.

PAUL, Michael et al. Water Management--a Core Task of the Wismut Remediation Programme. **Mining Report**, v. 151, n. 6, 2015.

PAUL, Michael; MANN, Stefan; JAKUBICK, Alexander T. Environmental clean-up of the East German uranium mining legacy: The WISMUT remediation program1. In: **Proc. 8th Int. Conf. on Acid Rock Drainage (ICARD)**. 2009.

PEPPER, Mia et al. Closing ranger, protecting Kakadu. 2020.

PERRONE, Angela; LAPENNA, Vincenzo; PISCITELLI, S. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 135, p. 65-82, 2014.

PORSANI, Jorge Luís et al. GPR applied to mapping utilities along the route of the Line 4 (yellow) subway tunnel construction in São Paulo City, Brazil. **Journal of applied geophysics**, v. 80, p. 25-31, 2012.

PORSANI, Jorge Luís et al. Investigações GPR nos distritos mineiros de Santa Bárbara e Bom Futuro: Província estanífera de Rondônia. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, p. 57-68, 2004.

PRIEST, Stephen Donald. **Discontinuity analysis for rock engineering**. Springer Science & Business Media, 1993.

RAPANTOVA, Nada et al. Ground water flow modelling applications in mining hydrogeology. **Mine water and the environment**, v. 26, p. 264-270, 2007.

RASHED, Mohamed et al. Ground penetrating radar investigations across the Uemachi fault, Osaka, Japan. **Journal of Applied Geophysics**, v. 53, n. 2-3, p. 63-75, 2003.

REA, Jane Mary Anastasia. **Ground penetrating radar applications in hydrology**. 1996. Tese de Doutorado. University of British Columbia.

READ, John; STACEY, Peter. **Guidelines for open pit slope design**. 2009.

RESENDE, Alessandro Gomes; LIMA, Hernani Mota de. Análise das concessões de lavra quanto às suspensões temporárias de operação. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, p. 539-544, 2009.

SALUM, M. J. G. **FECHAMENTO DE MINA E COMUNIDADES**. Workshop Recursos Minerais e Sociedade CETEM -Rio de Janeiro, 29-30 de julho de 2010.

SÁNCHEZ, Luis Enrique; SILVA-SÁNCHEZ, Solange Santos; NERI, Ana Claudia. **Guia para o planejamento do fechamento de mina**. 2013.

SARDINHA, Diego de Souza et al. Base de dados de desastres naturais no município de Poços de Caldas/MG: ferramenta para o planejamento e a gestão territorial. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 8, p. 318-331, 2016.

SCHORSCHER, H. D.; SHEA, M. E. The regional geology of the Poços de Caldas alkaline complex: mineralogy and geochemistry of selected nepheline syenites and phonolites. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 45, n. 1-3, p. 25-51, 1992.

SEN, P. N. Relation of certain geometrical features to the dielectric anomaly of rocks. **Geophysics**, v. 46, n. 12, p. 1714-1720, 1981.

SIGURDSSON, Thrainn. Application of GPR for geological mapping, exploration of industrial mineralization and sulphide deposits. **Fifth International Conferention on Ground Penetrating Radar**, p. cp-300-00068, 1994.

SILVA, Carlos César Nascimento et al. Resistivity and ground-penetrating radar images of fractures in a crystalline aquifer: a case study in Caiçara farm—NE Brazil. **Journal of applied geophysics**, v. 56, n. 4, p. 295-307, 2004.

SIMATE, Geoffrey S.; NDLOVU, Sehliselo. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 2, n. 3, p. 1785-1803, 2014.

SINGH, Jiwan; KALAMDHAD, Ajay S. Effect of *Eisenia fetida* on speciation of heavy metals during vermicomposting of water hyacinth. **Ecological engineering**, v. 60, p. 214-223, 2013.

SJÖBERG, J.; NORSTROM, U. Failure mechanisms for high slopes in hard rock. **Slope stability in surface mining**, p. 71-80, 2000.

SKOUSEN, Jeff; LAREW, Glenn. Alkaline overburden addition to acid-producing materials to prevent acid mine drainage. In: **International Land Reclamation and Mine Drainage Conference**. Pittsburgh, PA.: Bureau of Mines SP 06B-94, 1994. p. 375-381.

SKOUSEN, Jeffrey et al. Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage. **National Mine Land Reclamation Center, Morgantown**, v. 131, 1998.

SKOUSEN, Jeffrey G.; ZIEMKIEWICZ, Paul F.; MCDONALD, Louis M. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. **The Extractive Industries and Society**, v. 6, n. 1, p. 241-249, 2019.

SMITH, F. W.; UNDERWOOD, B. Mine closure: the environmental challenge. **Mining Technology**, v. 109, n. 3, p. 202-209, 2000.

SOCCO, Laura Valentina et al. Geophysical investigation of the Sandalp rock avalanche deposits. **Journal of Applied Geophysics**, v. 70, n. 4, p. 277-291, 2010.

SOTO, Raimundo. End of the line: Railroads in Chile. 2010.

SOUZA, Ariadne Marra; SILVEIRA, Carla Semiramis; PEREIRA, Ronaldo Mello. Contribuições dos metais provenientes das pilhas de rejeito da Mina Osami Utsumi em drenagens do Complexo Alcalino de Poços de Caldas. **Geochimica Brasiliensis**, v. 27, n. 1, p. 63-63, 2013.

SOUZA, Danusa Mayara; LUIZ, José Gouvêa. Radar de penetração no solo aplicado à análise ambiental de posto de combustíveis pós-remediação. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 3, p. 143-153, 2017.

SOUZA, Vicente Paulo de. **Drenagem ácida, aspectos ambientais: uma revisão**. 2015.

STANFOCA CASAGRANDE, M. F.; MOREIRA, C. A. Investigação geofísica em bota-fora de estéril afetado por processo de drenagem ácida na mina Osamu Utsumi – Poços de Caldas - MG. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29297>. Acesso em: 31 maio. 2023.

STEVENS, K. M. et al. The application of ground penetrating radar for mapping fractures in plutonic rocks within the Whiteshell Research Area, Pinawa, Manitoba, Canada. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, n. 1-3, p. 125-141, 1995.

SUN, Zhenyu et al. Analysis of the interaction between tunnel support and surrounding rock considering pre-reinforcement. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 115, p. 104074, 2021.

TARGA, Débora Andrade et al. Structural analysis and geophysical survey for hydrogeological diagnosis in uranium mine, Poços de Caldas (Brazil). **SN Applied Sciences**, v. 1, p. 1-12, 2019.

TELFORD, William Murray et al. **Applied geophysics**. Cambridge university press, 1990.

THEUNE, Ulrich et al. Mapping fractures with GPR: A case study from Turtle Mountain. Mapping fractures with GPR. **Geophysics**, v. 71, n. 5, p. B139-B150, 2006.

TOKORO, Chiharu et al. Forecast of AMD quantity by a series tank model in three stages: Case studies in two closed Japanese mines. **Minerals**, v. 10, n. 5, p. 430, 2020.

TOVAR-SANCHEZ, Antonio et al. Metal contamination in interstitial waters of Doñana Park. **Journal of environmental management**, v. 78, n. 3, p. 286-293, 2006.

TRINDADE, Roberto de Barros Emery; SOARES, Paulo Sergio Moreira. Tecnologia de sistemas passivos para o tratamento de drenagem ácida de minas. 2004.

ULBRICH, Horstpeter H.; ULBRICH, Mabel NC. The lujavrite and khibinite bodies in the Poços de Caldas alkaline massif, southeastern Brazil: a structural and petrographic study. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 615-622, 2000.

ULBRICH, Horstpeter HGJ et al. Penecontemporaneous syenitic-phonolitic and basic-ultrabasic-carbonatitic rocks at the Poços de Caldas alkaline massif, SE Brazil: geologic and geochronologic evidence. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, 2002.

ULRIKSEN, C. Peter F. Application of impulse radar to civil engineering. **Lund Univ. Dr. Thesis**, 1982.

UNGER, C. et al. Mapping and prioritising rehabilitation of abandoned mines in Australia. **Proceedings Life-of-Mine**, p. 259-266, 2012.

VAITSMAN, D. S.; VAITSMAN, M. S. Água mineral. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2005.

VENKATESWARLU, B.; TEWARI, Vinod C. Geotechnical Applications of Ground Penetrating Radar (GPR). **Jour. Ind. Geol. Cong**, v. 6, n. 1, p. 35-46, 2014.

VILLAIN, Lucile et al. Evaluation of the effectiveness of backfilling and sealing at an open-pit mine using ground penetrating radar and geoelectrical surveys, Kimheden, northern Sweden. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, p. 4495-4509, 2015.

WARDLAW, S.; WAGNER, R. Development of waste rock sampling protocol using induced polarization. **CANMET-MSL Div., 777-071, Final Rep**, 1994.

WEBER, Markus; BRANDT, Wilfred. MINERAÇÃO CORRETIVA PÓS-FECHAMENTO: PASSIVO AMBIENTAL X ATIVO ECONÔMICO.

Western Pennsylvania Conservancy. Conserve – Abandoned Mine Drainage. Vol. 49. No. II. 2006.

WILLENBERG, Heike. **Geologic and kinematic model of a complex landslide in crystalline rock (Randa, Switzerland)**. 2004. Tese de Doutorado. ETH Zurich.

YOUNGER, Paul L. et al. **Mine water hydrology**. Springer Netherlands, 2002.

ZAKARIA, Z. et al. Slope safety factor and its relationship with angle of slope gradient to support landslide mitigation at jatnanigor education area, Sumedang, West Java, Indonesia. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2018. p. 012052.