

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**Análise Geofísica e Estrutural em taludes de mina a céu aberto,
Mina Osamu Utsumi, Caldas (MG)**

Luiza Lima Alves

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro – SP

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

LUIZA LIMA ALVES

ANÁLISE GEOFÍSICA E ESTRUTURAL EM TALUDES DE MINA A CÉU
ABERTO, MINA OSAMU UTSUMI, CALDAS (MG)

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas –
Campus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Geóloga

Rio Claro – SP

2023

A474a Alves, Luiza Lima

Análise geofísica e estrutural em taludes de mina a céu aberto, Mina Osamu Utsumi, Caldas (MG) / Luiza Lima Alves. -- Rio Claro, 2023
48 f. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) -
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e
Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: César Augusto Moreira

1. Maciço rochoso. 2. Talude. 3. Instabilidade. 4. Acúmulo de água.
5. Fraturamento. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Luiza Lima Alves

ANÁLISE GEOFÍSICA E ESTRUTURAL EM TALUDES DE MINA A CÉU ABERTO,
MINA OSAMU UTSUMI, CALDAS (MG)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Dra. Livia Portes Innocente Helene

MsC. Lenon Melo Ilha

Rio Claro, 30 de Junho de 2023.

Documento assinado digitalmente
 LUIZA LIMA ALVES
Data: 05/07/2023 20:48:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) aluno(a)

Documento assinado digitalmente
 CESAR AUGUSTO MOREIRA
Data: 05/07/2023 16:45:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

À INB pela colaboração e por permitir o acesso às suas remediações e fazer com que a realização desse trabalho fosse possível. À Beatriz Duz e ao Felipe Miano pela grande ajuda nos trabalhos de campo durante a de aquisição dos dados e na etapa de escrita.

Ao Professor César por ter me acolhido como orientanda, por todo o respaldo, compromisso e lições nesse um ano de trabalho. Sobretudo, por ter me ouvido e acreditado em mim quando eu estava sem esperanças em relação ao futuro. Espero estar suprimindo suas expectativas.

Aos meus pais, Marco e Cármen, e à minha madrinha, Catia, por serem a maior base que eu poderia ter. Agradeço por sempre terem me levantado após cada queda, por terem me ensinado a sonhar, porém mantendo sempre meus pés no chão, e acima de tudo pelo apoio incondicional, fazendo de mim o que sou hoje.

Ao meu Tio Beto, por desde o início se interessar pela geologia, por me questionar e por ouvir cada uma das minhas histórias de saídas de campo.

Ao meu parceiro João Pedro, pelo carinho, pela companhia, pela força nesses últimos meses de graduação e por acreditar nos meus sonhos desde o início.

À Camilla por ter se tornado um porto seguro em meio ao completo caos da universidade, algo verdadeiro, no qual acreditar. Serei sempre grata por todo o apoio no início da nossa amizade, foi uma época difícil, e você a tornou tolerável. Agradeço por ter permanecido quando todos foram embora.

Ao meu Tchego, por mesmo depois de quase 10 anos, continuarem sendo um lar, uma certeza e uma presença indispensável. Agradeço por muitas vezes acreditarem mais em mim do que eu mesma. Por cada conversa, risada, conselho, abraço e histórias vividas, que serão guardadas como fotos em meu coração, para sempre.

Às “Luizas” do passado, de 6, 11 e 17 anos, eu agradeço por sempre reacenderem a chama desse desejo. A caminhada foi árdua, mas finalmente nos tornamos cientistas.

A todos, o meu muito obrigada!

*“Agarre o momento, aproveite,
você não tem motivos para ter medo”
(You’re On Your Own, Kid – Taylor Swift)*

RESUMO

Uma mineração é indispensável para as atuais necessidades da humanidade, e sua operação pode acarretar em uma série de problemas ambientais. Após o fim de suas atividades, é necessário que todos os passivos ambientais sejam controlados e estabilizados durante a fase de descomissionamento. No caso de uma mina a céu aberto, é importante a estabilização dos taludes da cava da mina, a fim de conter futuros movimentos de massa. A Mina Osamu Utsumi (MOU) está inserida na Unidade de Descomissionamento de Caldas, na região sudoeste do Estado de Minas Gerais, e no contexto geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. A mina está em descomissionamento desde 1995, quando suas atividades chegaram ao fim, e resultaram em sérios problemas ambientais, muitos deles relacionados à percolação de água no maciço rochoso e à instabilidade dos taludes. O presente trabalho atuou nos taludes da Frente SE da cava da mina, a fim de identificar zonas de acumulação de água no maciço e relacioná-las a zonas de movimento de massa. A Frente SE foi dividida em setores, denominados de: A (estabilidade mediana, sem percolação visível de água); B (maior instabilidade, fluxo visível de água); e C (alta estabilidade, maciço pouco alterado). Em cada setor foram investigados três taludes com o auxílio do equipamento de GPR *MALÅ Easy Locator WideRange*, que atua através da geração de radargramas em resposta a um caminhamento em linha reta. Os radargramas do Setor A indicaram a presença de falhas e/ou fraturas, em alguns casos relacionadas à queda de blocos, além do acúmulo de água no interior do maciço, mesmo com a ausência de fluxo na superfície. No Setor B, as áreas de fluxo superficial de água coincidiram com as áreas dos radargramas que mostram o acúmulo de água, além dos movimentos de massa, que também coincidiram com os perfis. No Setor C, os poucos pontos de instabilidade também foram indicados pelos radargramas, além de apresentar as fraturas e alguns acúmulos de água. Os perfis GPR mostraram o acúmulo e fluxo de água no interior dos taludes e sua ocorrência em áreas de fraturamento e escorregamentos. Dessa forma a relação entre esses 3 parâmetros é evidenciada, de modo a corroborar com estudos mais antigos realizados na área de estudo.

Palavras-chave: maciço rochoso; talude; instabilidade; acúmulo de água; fraturamento.

ABSTRACT

Mining activities are indispensable for humanity's current needs, and its operation can lead to a series of environmental problems. After the end of its activities, it is necessary for all environmental liabilities to be controlled and stabilized during the decommissioning phase. In the case of an open-pit mine, it is important to stabilize the mine pit slopes in order to contain future mass movements. The Osamu Utsumi Mine (MOU) is located within the Caldas Decommissioning Unit in the southwest region of the state of Minas Gerais, in the geological context of the Poços de Caldas Alkaline Massif. The mine has been in the decommissioning process since 1995 when its activities ceased, resulting in serious environmental problems, many of which are related to water percolation in the rock mass and slope instability. The present study is focused on the slopes of the SE Front of the mine pit in order to identify water accumulation zones in the rock mass and relate them to areas of mass movement. The SE Front was divided into sectors designated as: A (moderate stability, no visible water flow), B (greater instability, visible water flow), and C (high stability, minimally altered rock mass). Three slopes were investigated in each sector using the GPR *MALÅ Easy Locator WideRange* equipment, which generates radargrams in response to straight-line traverses. The radargrams from Sector A indicated the presence of faults and/or fractures, sometimes associated with block falls, as well as water accumulation within the rock mass, even in the absence of surface flow. In Sector B, areas of surface water flow coincided with the radargram areas showing water accumulation, as well as mass movements that also matched the profiles. In Sector C, the few points of instability were also indicated by the radargrams, along with the presence of fractures and some water accumulations. The GPR profiles revealed water accumulation and flow within the slopes, occurring in areas of fracturing and sliding. Thus, the relationship between these three parameters is evident, supporting previous studies conducted in the study area.

Key-words: rock mass; slope; instability; water accumulation; fracturing.

Lista de Figuras

Figura 1: Localização da Mina Osamu Utsumi e da área de estudos.....	3
Figura 2: Situação atual da cava.....	5
Figura 3: Sistema de drenagens do Planalto de Poços de Caldas.....	7
Figura 4: Mapa Geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas e localização da INB (traço vermelho).	10
Figura 5: Mapa Geológico da área da mina Osamu Utsumi.	11
Figura 6: (A) Maciço rochoso íntegro. (B) Áreas com escorregamento de blocos. (C) Áreas com percolação de fluidos através das fraturas. (D) Zona de minério residual aflorante.	12
Figura 7: Modelo esquemático das mineralizações de urânio e os tipos de corpos de minério (A, B e E).....	14
Figura 8: (A) Equipamento GPR. (B) Elementos interpretados em análise de radargrama....	15
Figura 9: Principais fatores que influenciam na perda do sinal de radar.	18
Figura 10: (A) Modos de ruptura de taludes rochosos. (B) Esquema de algumas das propriedades do maciço rochoso.	20
Figura 11: Frente SE com foco nos pontos de instabilidade, sendo as duas primeiras imagens de porções relacionadas à presença de minério residual.	21
Figura 12: Vista aérea da cava da mina com a delimitação das Frentes. Em seguida, vista frontal da Frente SE com a delimitação dos setores A, B e C.....	22
Figura 13: Equipamento GPR utilizado na investigação da subsuperfície.	22
Figura 14: Bancadas da Frente SE e as linhas percorridas com o GPR.....	23
Figura 15: (A) Fraturas visíveis na superfície do talude. (B) Área de queda de blocos em aproximadamente 45 metros. (C) Área com vegetação e possível presença de água na face, entre 70 e 80 metros.....	24
Figura 16: Atenuação no sinal até aproximadamente 2,5 metros de profundidade (linha serrilhada), provavelmente dada pela presença de água.....	25
Figura 17: (A) Zona inicial caracterizada pelo maciço íntegro. (B) Zona de ruptura onde a rocha está alterada.	26
Figura 18: (A) Zona de maciço fraturado. (B) Zona de material desagregado. (C) Zona de ruptura geral (a maior da Frente SE), com presença de minério residual e grande quantidade de material desagregado acumulado ao pé do talude, juntamente com acúmulo de água. (D) Zona de ruptura em detalhe.	27

Figura 19: (A) Presença de água evidenciada por deslizamentos no talude. (B) Maciço parcialmente íntegro, com presença de fraturas.	28
Figura 20: (A) Ruptura generalizada entre 40 e 60 metros. (B) Maciço íntegro de 70 a 100 metros.	29
Figura 21: (A) Fraturas visíveis na face do talude. (B) Rompimento na porção superior do talude. (C) Zona de rompimento em maior detalhe.	30
Figura 22: Área do maciço intensamente fraturada. A ausência de sinal pode indicar presença de água.	31
Figura 23: Maciço íntegro. Ausência de fluxo de água.	31
Figura 24: <i>Estereograma dos planos de fratura da Frente SE.</i>	32
Figura 25: <i>Distribuição das frequências das direções de mergulho da Frente SE.</i>	32

Lista de Tabelas

Tabela 1: Correspondências dos símbolos das Equações 1, 2, 3 e 4.....	16
Tabela 2: Correspondências dos símbolos da Equação 10.....	19
Tabela 3: Valores de frequência e profundidade máxima atingida.	19

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	2
3 LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA DE ESTUDO	3
3.1 MINA OSAMU UTSUMI.....	3
3.1.1 HISTÓRICO	4
3.1.2 DESCOMISSIONAMENTO.....	5
3.2 GEOMORFOLOGIA.....	6
3.3 HIDROLOGIA.....	6
3.4 CLIMA E VEGETAÇÃO	8
4 GEOLOGIA REGIONAL.....	9
4.1 MACIÇO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS.....	9
4.2 GEOLOGIA LOCAL	11
4.2.1 METALOGÊNESE.....	13
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
5.1 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO – RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO	15
5.1.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL – PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.....	16
5.1.2 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS	16
5.1.3 PERDA DE ENERGIA E ATENUAÇÃO	17
5.1.4 PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO.....	18
5.2 ANÁLISE ESTRUTURAL E DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	19
6 AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	21
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
7.1 SETOR A	24
7.2 SETOR B	26
7.3 SETOR C	29
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

Uma mineração é uma atividade econômica indispensável para suprir o atual estilo de vida e, consequentemente, as necessidades da humanidade. Os setores de uma mineração são a lavra, o beneficiamento e o transporte. A lavra é o conjunto de ações que englobam a extração da substância de valor econômico. O beneficiamento é responsável por separar o mineral de minério, aquele que apresenta importância econômica, do estéril. E o transporte é a distribuição do produto final, que pode ser o mineral puro ou um produto pronto para a venda.

A construção de uma mina deve ser planejada considerando critérios econômicos, ambientais e geotécnicos, e equívocos cometidos na etapa de planejamento desses fatores podem acarretar em problemas futuros no empreendimento mineiro, inclusive durante o processo de descomissionamento da mina (RENDU, 2017). Erros no dimensionamento e disposição dos taludes durante a construção da mina, por exemplo, podem acarretar em problemas de desestabilização, mesmo após o encerramento das atividades mineiras, como é o caso do estudo.

O descomissionamento de uma mina é estabelecido pela Agência Nacional de Mineração (ANM) e é uma das etapas que consta no Plano de Fechamento de Mina (PFM) (ANM, 2021). Para o descomissionamento ser considerado completo é necessária uma desmobilização das estruturas de lavra e beneficiamento, todos os passivos ambientais devem ser estabilizados física e quimicamente, além de habilitar a área para novos usos futuros (RENDU, 2017).

A geofísica é a ciência responsável pelo estudo indireto do subsolo, capaz de obter informações sobre os materiais encontrados em subsuperfície, por exemplo, através da propagação de ondas eletromagnéticas, como foi utilizado durante o presente estudo.

Já geotecnia é uma ciência que abrange o estudo da mecânica de solos e da mecânica das rochas, e a sua interação com obras civis (STRESSER *et. al.*, 2019). Na geologia, umas das aplicações da geotecnia é na estabilidade dos taludes de uma mina, de suma importância para a prevenção de acidentes e bom funcionamento do empreendimento.

A análise da instabilidade geotécnica em taludes pode ser feita adequadamente por meio da ferramenta tradicional, a geotecnia, porém seus resultados podem ser combinados com o diagnóstico indireto do interior do maciço rochoso, por meio de geofísica, a fim de um maior entendimento e detalhamento das variáveis que causam a instabilidade.

2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

O presente trabalho tem como objetivo a identificação da ocorrência de zonas de acúmulo de água no interior do maciço rochoso em uma mina de urânio a céu aberto, por meio de levantamento geofísico pelo método do Radar de Penetração no Solo (GPR) e análise estrutural relacionada a conceitos geotécnicos.

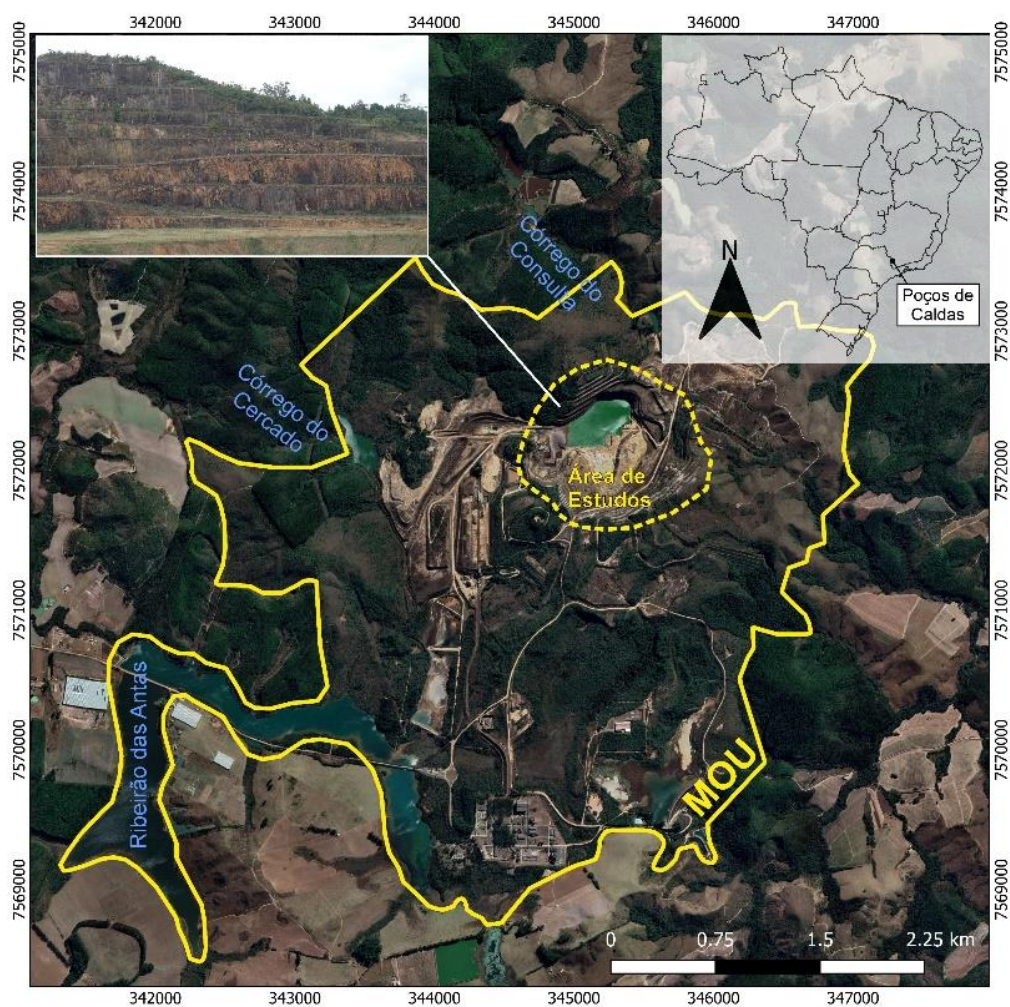
As análises mencionadas serão realizadas nos taludes de uma mina em processo de descomissionamento, porém o estudo não tem sua importância restrita a apenas esse caso, uma vez que as ações realizadas podem ser aplicadas em outras situações, como, também, para a estabilidade de taludes de laterais de rodovias, e até mesmo de minas em operação.

3 LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 MINA OSAMU UTSUMI

A Mina Osamu Otsumi (MOU) está inserida na Unidade de Descomissionamento de Caldas (UDC), mas durante o período de funcionamento era chamado de Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas (CIPC), e é administrada pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB). O Complexo Mineiro por sua vez, está localizado na porção centro-sul do Planalto de Poços de Caldas e na região sudoeste do Estado de Minas Gerais, mais especificamente, no município de Poços de Caldas (Figura 1).

Figura 1: Localização da Mina Osamu Utsumi e da área de estudos.



Fonte: Modificado de Alberti (2017).

3.1.1 HISTÓRICO

A ocorrência do minério de urânio no Planalto de Poços de Caldas foi descoberta em 1948 por técnicos do Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM). Nos anos 70, houve a criação da Nuclebrás, neste contexto os trabalhos de prospecção e pesquisa mineral foram intensificados e resultaram na descoberta das jazidas de uraninita (UO_2) do Campo do Cercado, onde está localizada a MOU. Em 1977 a mina foi decapeada e resultou na retirada de 33 milhões de m^3 de material. Em 1982, a exploração de urânio se iniciou, entretanto, em 1983 os investimentos da Nuclebrás foram reduzidos, tal qual o ritmo de produção da CIPC. Além disso, o escasso conhecimento sobre o minério prejudicou o funcionamento da mina, que operou de maneira descontínua até o encerramento das atividades em outubro de 1995 (Leite, 2010).

A lavra do minério, iniciada em 1981, foi feita a céu aberto com a utilização de bancadas com 4m de altura, em blocos de 5m x 2m. O teor de corte foi definido em 170 ppm de U_3O_8 solúvel recuperado e o material com teor inferior era considerado estéril, constituindo o rejeito da mina (CIPRIANI, 2002). A produção média de minério era de 2500 ton/dia e de minério marginal de 1500 ton/dia, com uma relação de estéril/minério de 23,8 (FRANKLIN, 2007).

O beneficiamento físico, consistia na britagem, moagem e espessamento do minério, para reduzir sua granulometria a fim de ser transportado ao beneficiamento químico. Na etapa de britagem, era adicionada pirolusita (MnO_2) para ocorrer a oxidação do U^{+4} para U^{+6} e da rocha fosfática em ácido fosfórico (H_3PO_4) que promovia a precipitação de zircônio e reduzia seus teores no produto (CIPRIANI, 2002). Na fase de moagem e espessamento era adicionado água tratada com cal, que resultava em uma polpa neutra com 55% de sólidos que posteriormente era bombeada para a usina de beneficiamento químico (TARGA, 2018). O beneficiamento químico era a última etapa do processo, nela, a polpa de minério era submetida a tratamento químico com a utilização de baterias de misturadores, responsável por concentrar o urânio sob a forma de diuranato de amômio (DUCA – “yellow cake”) (FRANKLIN, 2007).

3.1.2 DESCOMISSIONAMENTO

Atualmente, a Mina Osamu Utsumi está em processo de descomissionamento e recuperação ambiental (Figura 2). O descomissionamento consiste *num conjunto de ações tomadas no final da vida útil de uma instalação nuclear para sua retirada de serviço com o adequado cuidado para com a saúde e segurança dos trabalhadores e dos membros do público e a proteção do meio ambiente* (CIPRIANI, 2002). Um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) foi aprovado em 2012 pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), com o objetivo de estipular as melhores estratégias de remediação da área.

Figura 2: Situação atual da cava.



Fonte: Autoria própria.

Após a paralisação das atividades de lavra, diversos estudos mostraram que o empreendimento trouxe consequências ao ambiente traduzidos em alterações no meio físico, biótico e antrópico. Os principais problemas ambientais enfrentados pela Indústria Nuclear Brasileira (INB) para o descomissionamento adequado da mina são: concentrações elevadas de radionuclídeos e metais nas bacias de rejeito, contaminação por SO_4 , F, U e Mn nas águas de superfície (cava da mina) e subterrânea (SOUZA, et. al, 2013).

Na tentativa de aproveitar as instalações da Unidade de Descomissionamento de Caldas (UDC), a INB buscou obter licenciamento para produção de terras raras a partir da lavra de monazita, contudo, os passivos ambientais são um grande obstáculo para empresa que busca até hoje soluções para atender as exigências e fechar totalmente a mina (FRANKLIN, 2007).

3.2 GEOMORFOLOGIA

O Maciço Alcalino de Poços de Caldas apresenta forma elíptica moderada com eixo maior de 35 km na direção NE-SW e menor de 30 km para NW-SE (MORAES & RUEDA, 2008). Está localizado na Província do Planalto Atlântico, que é subdividida em Planalto Sul de Minas e Zona Cristalina do Norte (CAVALCANTI, et al. 1979). Esta região compreende altitudes entre 1300-1600 m acima do nível do mar e intercalação de planaltos e serras.

A feição principal do Maciço, foi produzida pela intrusão alcalina que resultou na elevação de mais de 1500m de altitude da paisagem regional há 80 Ma. Além disso, no final do Cretáceo, esta região foi afetada pela tectônica que formou sistemas de *rifts*, com alteração nas formas de relevo e as drenagens. A geomorfologia das superfícies planálticas é resultado das atividades magmáticas que formaram a caldeira alcalina, das atividades tectônicas recentes responsáveis por soerguer e abater os planaltos e de processos erosivos. Além disso, o dique anelar sustenta cotas que variam entre 1500-1600 m e é saliente na topografia em três quadrantes: norte, oeste e sul (MORAES & RUEDA, 2008).

A área pode ser dividida em dois grandes grupos morfológicos de paisagens: planálticas e aluviais. As planálticas são evidenciadas pela presença de taludes que limitam áreas planificadas ou planaltos com vestígios fisiográficas de planícies aluviais ou planaltos menores. Além de serem associadas em alguns casos a ocorrência de colinas dômicas ou alongadas. O segundo grupo, é caracterizado tipicamente por planícies de inundação e representados por terraços, diques marginais, leitos abandonados, solos orgânicos e depósitos de materiais aluvionais (MORAES & RUEDA, 2008).

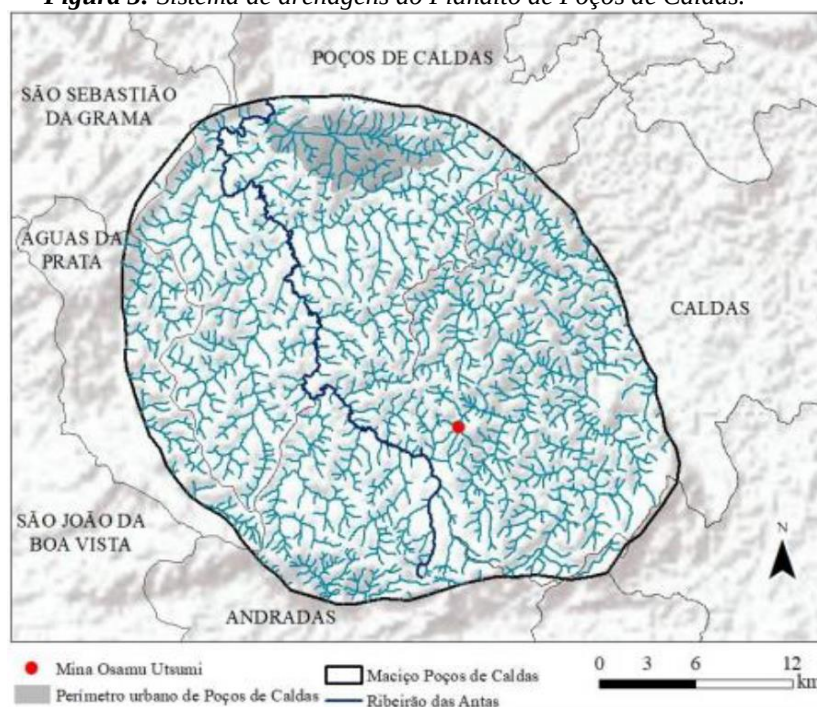
A MOU conta com uma área de 15 km² inserida morfologicamente em um terreno acidentado onde os vales encaixados influenciam o sistema de fraturamento regional do Planalto (MIYASAKI, 2014).

3.3 HIDROLOGIA

A região estudada está inserida na sub-bacia do rio Pardo, que pertence a bacia do rio Grande (Figura 3). Esta bacia é constituída de rochas magmáticas e de solo predominantemente argiloso, o que demonstra um elevado grau de fraturamento das rochas. Seus cursos d'água formam dois sistemas de drenagens: a do ribeirão das Antas e do rio Verde. O primeiro flui de águas de reservatório acumuladas a partir de barragens construídas para suprir a água da UDC, enquanto a drenagem do rio Verde é alimentada por acúmulos

pluviométricos. O escoamento superficial na região é de 1.215 mm onde cerca de 452 mm correspondem ao escoamento subterrâneo. Esse valor, relacionado ao total de chuva anual, fornece uma estimativa da taxa de infiltração na bacia na ordem de 27,6% (CRUZ E PEIXOTO 1991). A elevada taxa de infiltração em conjunto com o grande volume de restituição dos rios caracteriza uma área com elevado grau de fraturamento e potencial hídrico subterrâneo (CRUZ E PEIXOTO, 1991).

Figura 3: Sistema de drenagens do Planalto de Poços de Caldas.



Fonte: Targa (2018).

No interior do maciço, a rede de drenagem escoar em estruturas circulares sobre litotipos e estruturas da região (GARDA, 1990). A rede de drenagem foi formada por influência das estruturas e das litologias presentes no maciço (GARDA, 1990). Além disso apresenta alta densidade com três padrões principais: dendrítico a sub-dendrítico (maior ocorrência), treliça em falha e anelar. O padrão dendrítico pode ser observado no interior do planalto em áreas de menor declividade. (MORAES, 2007). O padrão anelar é encontrado em grandes trechos de rios localizados nas bordas do planalto, resultantes do forte controle estrutural determinado pela intrusão alcalina. A sinuosidade é definida como mista e o sistema de drenagem regional é multidirecional com assimetria fraca.

A mina Osamu Utsumi apresenta entre dois sistemas hídricos subterrâneos distintos. O primeiro está localizado no interior das pilhas de rejeito e no material de transição (rocha

alterada, solo e material estéril) e, portanto, possui características de aquífero livre. O segundo está sotoposto ao primeiro, no interior do maciço rochoso e apresenta elementos de aquífero fraturado, responsável pelas reações de hidrólise e oxidação típicas do intemperismo (FRANKLIN, 2007). Os cursos d'água da MOU escoam por vales encaixados com encostas íngremes, com zona de recarga nas encostas e interflúvios e zonas de descargas nos fundos dos vales.

3.4 CLIMA E VEGETAÇÃO

O clima presente no Planalto de Poços de Caldas é caracterizado como tropical de altitude com duas estações bem definidas ou Cwb (segundo classificação de Köppen-Geiger). A primeira conta com chuvas intensas variáveis entre 100mm e 250 mm por mês, temperatura amena (média de 26°C) e ocorre entre os meses de outubro e março. A segunda ocorre no período de abril a setembro e é marcada por intensa estiagem com precipitações mensais no intervalo de 15 a 80 mm e baixas temperaturas (média de 18°C). O total de precipitação neste período de abril a setembro representa apenas 5% do total anual. A média pluviométrica é de 1700 mm/ano onde 82% deste total ocorre durante a primeira estação (FAGUNDES, 2005). A temperatura nos meses mais frios varia de -3°C a 18°C e nos meses mais quentes > 10°C (SADMET/INMET). Além disso, o gradiente térmico está na ordem de 0,65°C/100 metros durante o mês mais quente e de 0,59°C/100 metros no mês mais frio (MORAES, 2007). A umidade relativa do ar média é de 78,2%. Os ventos têm direção preferencial NE-SW, com velocidade média anual de 1,8 m/s (FAGUNDES, 2005).

A região é composta por vegetações características de campos de altitude, onde prevalecem gramíneas rústicas, principalmente o capim “barba de bode” e vegetação arbórea e arbustiva espalhada em pequenas manchas ao longo dos principais cursos d'água (CIPRIANI, 2002).

4 GEOLOGIA REGIONAL

A Mina Osamu Utsumi (MOU) está situada no Maciço Alcalino de Poços de Caldas de idade Mesozóica, localizado nos limites entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, que compreende os municípios de Poços de Caldas, Caldas, Andradas e Águas da Prata.

4.1 MACIÇO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS

O Maciço Alcalino é uma estrutura vulcânica circular de formato dômico delimitada por escarpas de falhas que afetaram o embasamento cristalino. (ALBERTI, 2017). Esta estrutura tem cerca de 30km de diâmetro, uma área de 800 km² e está inserido na porção meridional do Escudo Atlântico, próximo a borda nordeste da Bacia do Paraná.

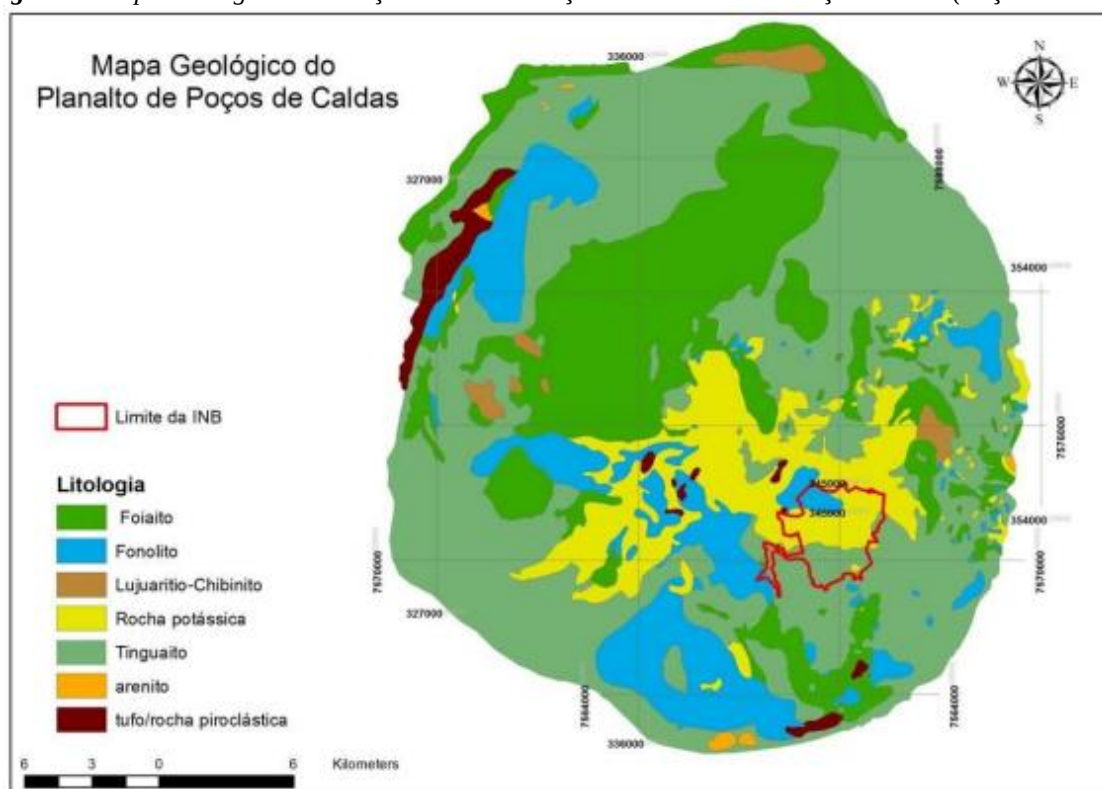
O Maciço Alcalino é composto principalmente por nefelinas sienitos (com lujaunitos e chibinitos), tinguaitos, fonólitos, foiaítos, rochas piroclásticas supracrustais e intratéluricas, rochas sedimentares epiclásticas (brechas, tufos e aglomerados) (GARDA, 1990). Além da existência de uma rocha potássica resultante de processos hidrotermais que alteraram o tinguaito, responsável pelo controle das mineralizações uraníferas (BIONDI, 1976). O embasamento cristalino é formado por granitos e gnaisses de idade Arqueana, entretanto, ele não ocorre no interior do maciço, o que permite admitir que após a atividade vulcânica houve colapso compensado pela ascensão do magma (ELLERT, 1959).

O modelo evolutivo adotado para o Maciço Alcalino de Poços de Caldas é o de erupção em caldeira com colapso, proposto por Ellert (1959). A etapa inicial consistiu na formação de um domo, com posterior colapso e formação da caldeira seguida da geração de brechas e tufos, além da intrusão de tinguaitos, nefelina sienitos e fonólitos por meio de fendas radiais e concêntricas (Ulbrich, 1984). Em estágios finais ocorreu a geração de diques anelares, intrusão de lujaunitos, chibinitos e foiaítos associados a hidrotermalismo (Figura 4).

O Maciço Alcalino apresenta uma ampla evolução geológica registrada por uma série de eventos tectônicos e magmáticos que compreende uma relação genética com um *trend* de falhas profundas do Arqueano reativadas durante o Mesozóico (LOUREIRO & SANTOS, 1988). Esta reativação tectônica está associada à fragmentação do supercontinente Gondwana, a posterior ruptura dos continentes sulamericano e africano e a abertura do Oceano Atlântico que gerou alívio de tensões decorrente da rotação da plataforma Sul-Americana e resultou na reativação de fraturas pré-existentes (ALMEIDA et al., 1976). Este complexo conta com um

número significativo de descontinuidades, falhas e fraturas. As falhas são representadas por dois grandes sistemas com direções predominantes N40E, relacionada a tectônica regional e N60W, relacionada ao processo de formação da caldeira. (FRAENKEL et al, 1985). Existem ainda falhamentos que afetaram o maciço por completo com direção tangencial à estrutura anelar e estruturas circulares associadas interpretadas como cones vulcânicos no interior do maciço que são resultado da alteração hidrotermal associada com o sistema de falhas.

Figura 4: Mapa Geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas e localização da INB (traço vermelho).



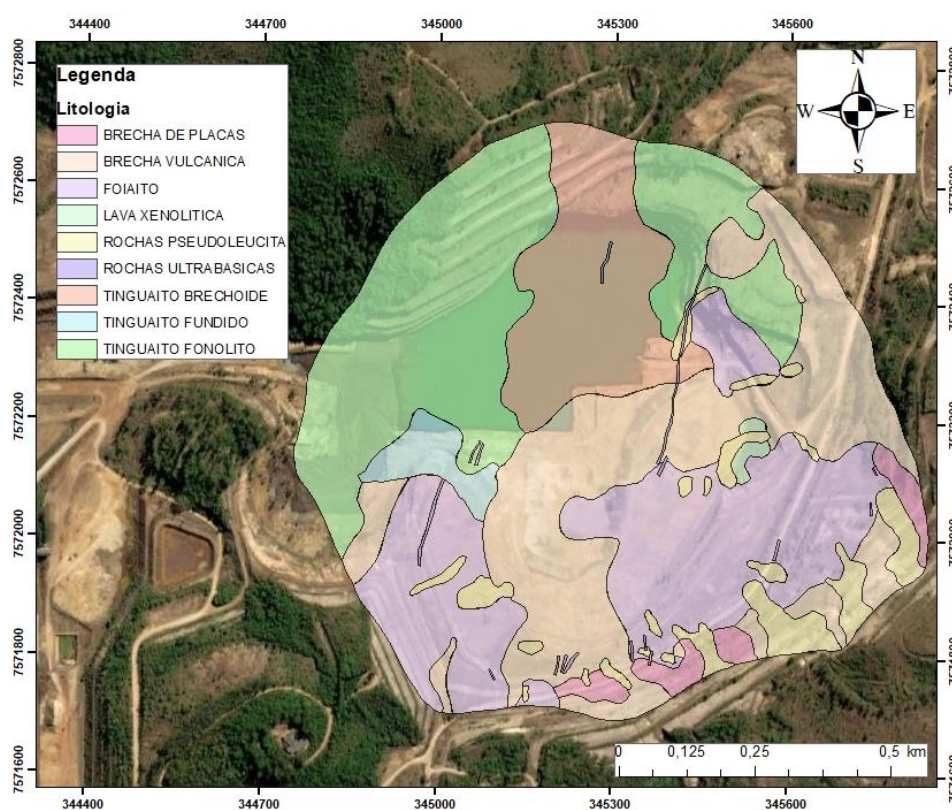
Fonte: Adaptado de Fraenkel et al (1985) por Alberti (2017).

Um quarto da área do Maciço Alcalino de Poços de Caldas é composta de rochas alteradas por processos de hidrotermalismo (GARDA, 1990). A alteração hidrotermal seguida de processos de intemperismo profundo e laterização do solo são responsáveis pelas principais mineralizações de Zr, U, Mo, Th e terras raras contidas nas rochas potássicas desse complexo e evidenciadas por um empobrecimento de sílica e alumínio e um aumento excessivo dos teores de K, Na e Ca. Estes processos de alteração são considerados pós-magmáticos e estão associados a evolução do complexo.

4.2 GEOLOGIA LOCAL

A mina Osamu Utsumi é composta litologicamente por uma sequência de rochas vulcânicas e subvulcânicas, intrusões de nefelina-sienito e mineralização de urânio (Figura 5). As rochas sofreram alterações hidrotermais resultante das fases finais do vulcanismo aliadas a processos metassomáticos responsáveis pelas alterações potássicas e por formar as mineralizações de urânio disseminadas (pitchblenda).

Figura 5: Mapa Geológico da área da mina Osamu Utsumi.



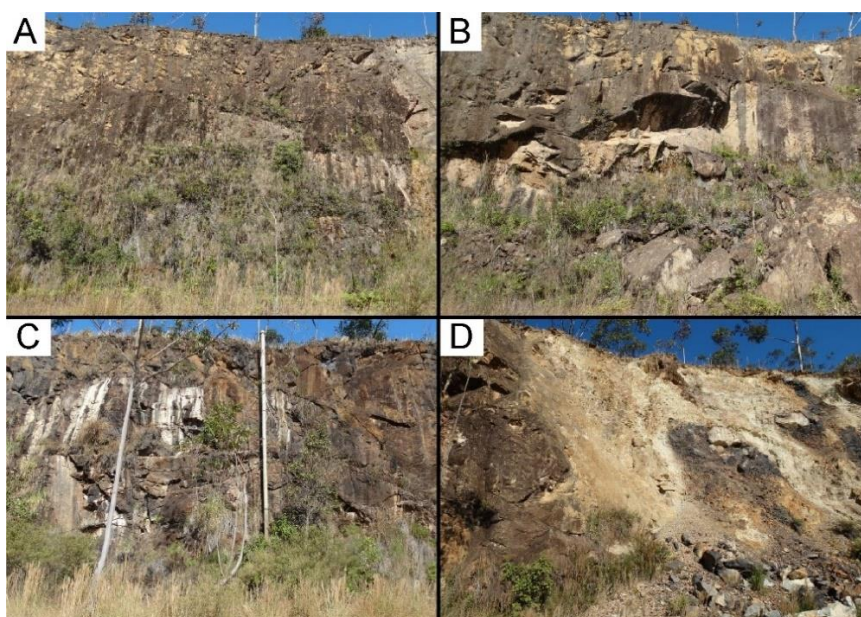
Fonte: Adaptado de MAGNO JÚNIOR (1985).

A litologia dominante na área são os nefelina-sienitos afetados por processos vulcânicos e hidrotermais responsáveis pela formação das variedades estruturais (brechas), texturais (foiaítos), extrusivas (fonólitos) e hipoabissais (tinguaítos). No Norte da mina, predominam fonólitos pouco alterados enquanto no Sul prevalecem nefelina-sienitos bastante alterados e a mineralização de urânio, além da presença de brecha vulcânica na porção central intercalada com nefelina-sienito. Na área superficial ocorrem materiais alterados predominantemente argilosos com espessura entre 15 a 100 m (SCHORSCHER & SHEA, 1992).

As mineralizações de urânio estão associadas aos processos hidrotermais que formam o minério primário e processos intempéricos que formam o minério secundário. Os corpos mineralizados se formaram dentro uma grande chaminé de brecha, de forma cônica que é quase toda preenchida por tinguaitos intrundidos por inúmeros diques lamprófiros e *pipes* de 80 m de diâmetros (BIONDI, 1976). Os *pipes* e diques contêm minério primário, onde o urânio ocorre como uraninita. Um destes diques foi datado de 76 Ma e indicou um resfriamento rápido para temperaturas abaixo de 100 °C, ou seja, condições de intemperismo. As brechas são produto de explosões magmáticas tardias durante o evento hidrotermal e são responsáveis por alojar altas concentrações de urânio em sua matriz. (CAPOVILLA, 2001). As rochas localizadas no interior e nas bordas da chaminé de brecha sofreram alterações hidrotermais profundas que tornou a matriz plástica/friável, com impregnações dos óxidos de urânio.

As mineralizações secundárias de urânio foram formadas a partir de duas frentes redox. Uma frente principal e contínua por toda área controlada por zonas fraturadas e rochas porosas que permitem alcançar altas profundidades e formam rochas oxidadas e, a outra consiste em várias frentes locais de caráter secundário, controlada litologicamente por rochas com baixa porosidade e permeabilidade que permitem a variação da infiltração do fluido de cima para baixo (CAPOVILLA, 2001) (Figura 6).

Figura 6: (A) Maciço rochoso íntegro. (B) Áreas com escorregamento de blocos. (C) Áreas com percolação de fluidos através das fraturas. (D) Zona de minério residual aflorante.



Fonte: Autoria própria.

4.2.1 METALOGÊNESE

A alteração hidrotermal que gerou a mineralização de U, iniciou após as alterações magmáticas dos fonólitos e nefelina-sienitos e, foram concluídas antes da intrusão dos diques de lamprófiros a 76 Ma (SHEA, 1991). As rochas foram invadidas por soluções hidrotermais carregadas de urânio e outros elementos por sistemas verticais, e aproveitaram a permeabilidade dos corpos de brechas, o que resultou na impregnação de urânio e outros elementos químicos na matriz destas brechas.

São possíveis a formação de três tipos básicos de depósito de urânio de controle: químico, litológico e tectônico, que podem ser subdivididos em mineralizações do tipo primitiva ou secundária. A primitiva está ligada aos fenômenos de percolação de fluidos hidrotermais enquanto as secundárias, ligadas ao avanço de uma frente de oxi-redução, processos de intemperismo e alteração supergênica (CAPOVILLA, 2001). Além disso, reconcentrações secundárias relacionadas ao avanço descendente de soluções intempéricas oxidantes detectadas em regiões próximas a superfície, são desenvolvidas a partir da solubilização e reprecipitação do urânio em ambientes favoráveis. Esse tipo de mineralização uranífera é expressa como secundária formada por óxidos (UO_2 , UO_3).

A mina está localizada na borda de uma intrusão sienítica secundária e a formação dos depósitos está relacionada a intrusão de foiaíta em rochas tinguaíticas (hospedeiras), seguida por alterações hidrotermais sobre as rochas locais, que promoveu uma concentração acentuada de minérios metálicos (sulfetos), minerais de urânio e molibdênio e o enriquecimento em potássio. O corpo mineralizado da MOU tem dois níveis médios de enriquecimento entre as cotas de 1150-1120 m e 1030-980 m (GARDA, 1990).

A mineralização de urânio foi dividida em três corpos: A, B e E (Figura 7). A formação do Minério Tipo A é associada aos diques e *pipes* de brechas de fluidização que intrudem toda a região da mina. As brechas são compostas por fragmentos da rocha encaixante com formatos angulosos e são cimentadas por uma matriz composta de massas tinguaíticas/fenolíticas com predominância de sericita e feldspato potássico. Impregnações de pirita, fluorita, galena, esfalerita, minerais de urânio, molibdênio, zircônio são comuns (CIPRIANI, 2002). Grande parte do minério de urânio estava na malha cristalina do zircão e, correspondia a 10% das reservas do depósito (REYNOLDS, 1954; LORENZ et al., 1970 citado por Alberti, 2017). O teor médio deste corpo era de 600 ppm de U (CIPRIANI, 2002).

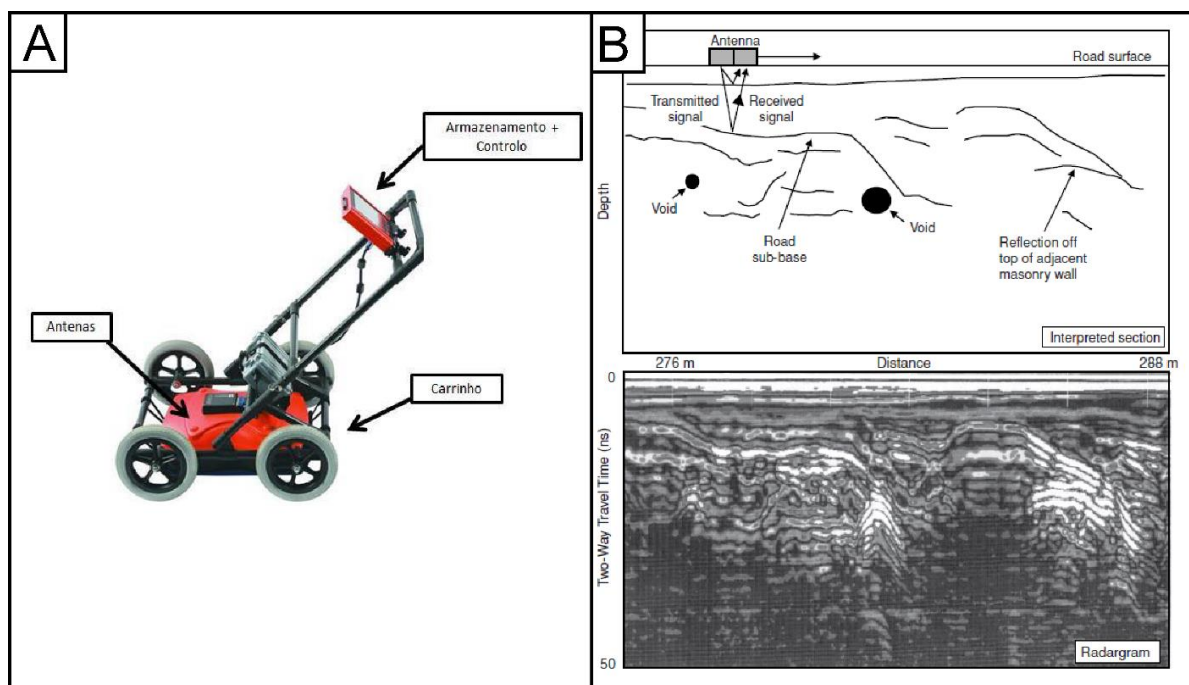
5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO – RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO

O método de Radar de Penetração no Solo (GPR) consiste na propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência no imageamento raso do subsolo. Possibilita a identificação de diferentes estruturas geológicas, como falhas e fraturas, além de cavidades, nível freático, presença de minerais metálicos, e também, de encanamentos e tubulações. As ondas eletromagnéticas são propagadas de forma distinta em cada um desses materiais, ou feições geológicas, desse modo são gerados resultados diferentes, tornando possível a sua identificação.

Os equipamentos de GPR são compostos por uma antena transmissora que emite os pulsos eletromagnéticos, uma antena receptora que analisa o sinal das ondas após serem refletidas pelo meio, uma unidade de controle e um módulo de visualização onde o imageamento é observado (Figura 8).

Figura 8: (A) Equipamento GPR. (B) Elementos interpretados em análise de radargrama.



Fonte: Reynolds (2011).

A frequência das ondas emitidas pelo equipamento varia de 10 MHz a 2500 MHz, e essa diferença e o tipo do material influenciam na profundidade de investigações, por mais

que essa medida geralmente esteja limitada a 20m em solos tropicais. No presente estudo o equipamento GPR foi utilizado nos patamares da cava a fim de identificar fraturas e possíveis acúmulos de água nos taludes.

5.1.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL – PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Como mencionado anteriormente, o GPR atua por meio da propagação de ondas eletromagnéticas e tem como fundamentação teórica as Equações de Maxwell, que descrevem o comportamento dos materiais ao serem submetidos a campos diversos (SANTOS, 2019). No caso, serão levados em consideração campos eletromagnéticos, sendo as Equações de Maxwell para meios magnéticos e/ou polarizáveis (SANTOS, 2019):

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Na Tabela 1 estão expostos os símbolos das equações e suas respectivas correspondências.

Tabela 1: Correspondências dos símbolos das Equações 1, 2, 3 e 4.

Símbolo	Corresponde a:
$\vec{E}$	Vetor campo elétrico (V/m)
$\vec{B}$	Vetor indução magnética (T)
$\vec{J}$	Vetor densidade de corrente elétrica (A/m ²)
$\vec{D}$	Vetor deslocamento elétrico (C/m ²)
$\vec{H}$	Vetor campo magnético (A/m)
ρ	Densidade de carga elétrica (C/m ³)
t	Tempo (s)

5.1.2 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS

De acordo com Santos (2019), as relações constitutivas definem o comportamento dos componentes do meio à propagação de ondas eletromagnéticas e, na utilização do GPR, os meios são tratados como homogêneos isotrópicos e lineares, de modo que certas propriedades

serão tomadas como medidas escalares que independem do campo eletromagnético aplicado, tais como a condutividade elétrica, permissividade elétrica e permeabilidade elétrica (SANTOS, 2019).

Há três relações constitutivas, a primeira é a relação entre densidade de corrente elétrica e condutividade, a segunda é a relação entre permissividade dielétrica e campo elétrico, e a terceira é a relação entre indução magnética e campo magnético.

A relação entre densidade de corrente elétrica e condutividade é dada pela Lei de Ohm e descreve o fluxo de cargas livres em um meio de condutividade σ (expressa por S/m), sobre a influência de um campo elétrico, e é dada pela Equação 5:

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

A relação entre permissividade dielétrica e campo elétrico é expressa pela Equação 6:

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

A permissividade dielétrica ε representa o deslocamento das cargas da estrutura de um material ao ser submetido a um campo elétrico, e esse deslocamento resulta em um acúmulo de energia. Com o cessar do campo elétrico há liberação de energia conforme as cargas retornam ao equilíbrio, caracterizando a permissividade relativa, dada pela Equação 7:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (7)$$

onde ε_0 é a permissividade dielétrica no vácuo ($\varepsilon_0 = 8,89 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$).

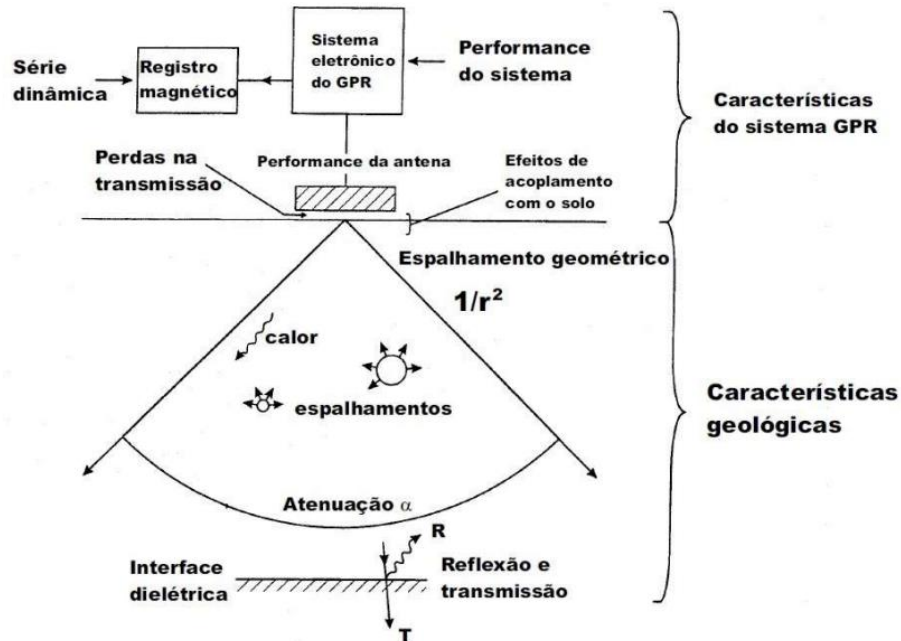
A relação entre indução magnética e campo magnético é dada pela permeabilidade magnética μ , caracterizada pelo momento magnético dos átomos e das moléculas em resposta a um campo magnético, exemplificada pela Equação 8:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (8)$$

5.1.3 PERDA DE ENERGIA E ATENUAÇÃO

Assim como qualquer método indireto de investigação do subsolo, a profundidade de atuação do GPR é influenciada pela perda de energia, gerada por diversos fatores (Figura 9). Um desses fatores é a atenuação da onda emitida pelo radar, que depende da frequência do sinal, da condutividade, e da permeabilidade magnética do material (SANTOS, 2019).

Figura 9: Principais fatores que influenciam na perda do sinal de radar.



Fonte: Reynolds (1997), citado por Santos (2019).

Além disso, de acordo com Santos (2019), há o fator de espalhamento geométrico, uma vez que a emissão de sinal do GPR apresenta uma abertura angular em forma de cone. Ademais, há a difração causada por corpos de mesmo, ou menor, tamanho do comprimento de onda.

Deve ser considerada também a reflexão ocorrida pelos contrastes de constante dielétrica, quanto maior o contraste, maior é a quantidade de energia refletida, e é dado pelo coeficiente de reflexão, representado na Equação 9 (SANTOS, 2019):

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon'_{r1}} - \sqrt{\epsilon'_{r2}}}{\sqrt{\epsilon'_{r1}} + \sqrt{\epsilon'_{r2}}} \quad (9)$$

onde R é o coeficiente de reflexão, ϵ'_{r1} é a constante dielétrica do meio 1 e ϵ'_{r2} é a constante dielétrica do meio 2.

5.1.4 PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO

A profundidade de investigação do GPR é afetada principalmente pela performance do sistema, atenuação do sinal e reflexão nas interfaces (Davis e Annan, 1989, citado por Santos, 2019). O alcance do sinal pode ser expressado por:

$$Q = \frac{\xi_T \xi_R G_T G_R g \sigma_C e^{-4\alpha L}}{64 \cdot 3 f^2 L^4} \quad (10)$$

Na Tabela 2 estão expostos os símbolos das equações e suas respectivas correspondências.

Tabela 2: Correspondências dos símbolos da Equação 10.

Símbolo	Corresponde a:
ϱ	Performance do sistema ou razão entre a amplitude do sinal transmitido e a mínima sensibilidade registrada
ξ_T	Eficiência da antena transmissora
ξ_R	Eficiência da antena receptora
G_T	Ganho na antena transmissora
G_R	Ganho na antena receptora
L	Distância do alvo
α	Atenuação do meio
f	Frequência
g	Ganho do retro-espalhamento no alvo
σ_C	Área da seção transversal do espalhamento no alvo

Além disso, a frequência central da antena também contribui na limitação da propagação da onda eletromagnética em subsuperfície. Quanto maior for a frequência da onda, maior será a resolução do resultado, em contrapartida, a profundidade atingida será menor.

Na tabela 3 constam valores de frequência e a profundidade máxima atingida, baseados em dados empíricos (Annan, 2001, citado por Santos, 2019).

Tabela 3: Valores de frequência e profundidade máxima atingida.

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

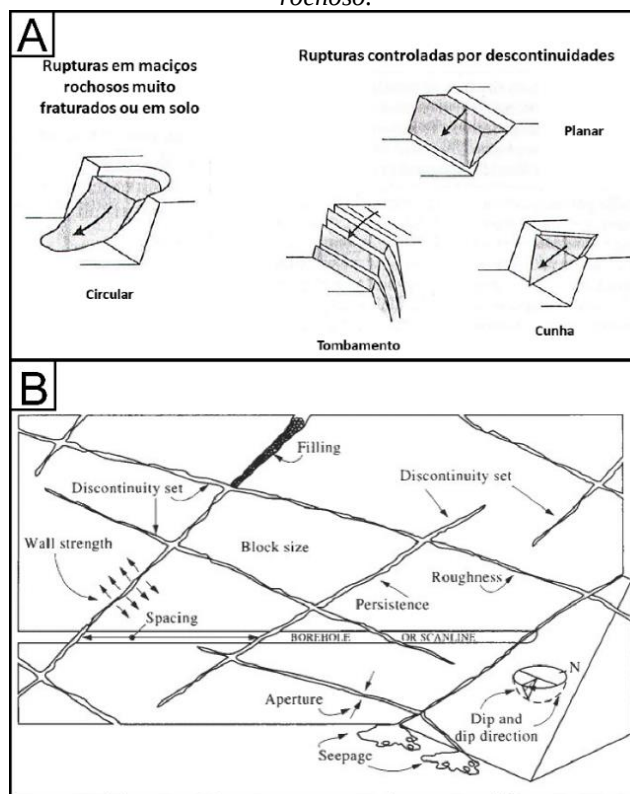
5.2 ANÁLISE ESTRUTURAL E DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

A utilização de levantamentos estruturais em áreas de mineração contribui para o aprimoramento do processo de prospecção e extração do minério e a definição de áreas de instabilidade que possam atrapalhar o bom funcionamento do empreendimento. O tipo de análise estrutural utilizada dependerá basicamente do objetivo do estudo, que pode envolver problemas de caráter geotécnico, ambiental, hidrogeológico e metalogenético.

Após a obtenção dos dados GPR, foram realizadas análises estruturais para uma avaliação das causas de instabilidade nos taludes. Segundo Hoek e Bray (1974), taludes

rochosos apresentam quatro modos de ruptura (Figura 10A), e na área de estudos o mais comum é a ruptura em cunha. Além disso, um maciço rochoso é composto pela matriz rochosa (rocha intacta), descontinuidades geológicas e fluídos existentes em seus vazios (Figura 10B) (Hudson e Harrison, 1997).

Figura 10: (A) Modos de ruptura de taludes rochosos. (B) Esquema de algumas das propriedades do maciço rochoso.



Fonte: (A) Modificado de Hoek e Bray (1981). (B) Hudson e Harrison (1997).

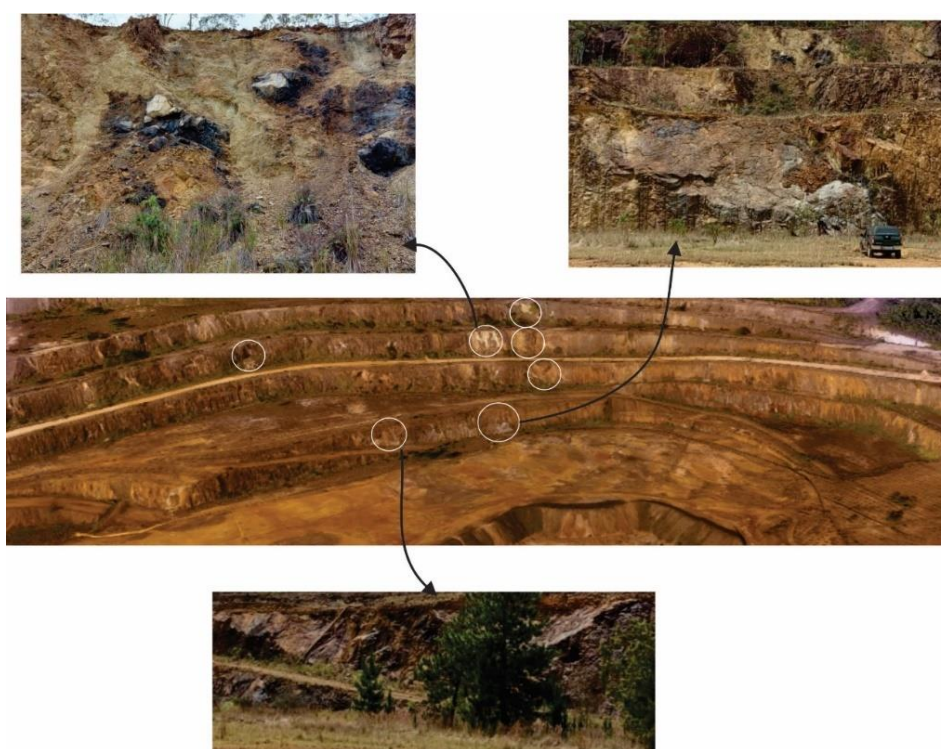
Em Targa (2018) foram realizadas mais de 750 medidas estruturais de mergulho e rumo das fraturas em todas as frentes de lavra da MOU, além de separar os principais domínios e famílias. Os dados desse trabalho serão relacionados e analisados em comparação aos dados GPR.

O trabalho de Camarero (2022) apresenta um levantamento estrutural e geofísico em várias frentes de lavra na mesma mina, por meio de linhas de tomografia elétrica (ERT). Os resultados demonstraram a relação entre zonas de acúmulo de água no interior da rocha com surgências visíveis em frentes de lavra. Contudo, o método geofísico empregado não apresentou resolução para reconhecimentos de sistemas de fratura, ou mesmo individualização de zonas de fraturas secas ou úmidas, elementos fundamentais para análises de instabilidade geotécnica previsionais.

6 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Após visitas de reconhecimento à cava da mina, a Frente SE foi definida como o foco dos estudos, uma vez que apresenta heterogeneidade do maciço, caracterizado pela presença de diversos pontos de instabilidade dos taludes e surgência de água em algumas fraturas, ou pela ausência desses fatores (Figura 11).

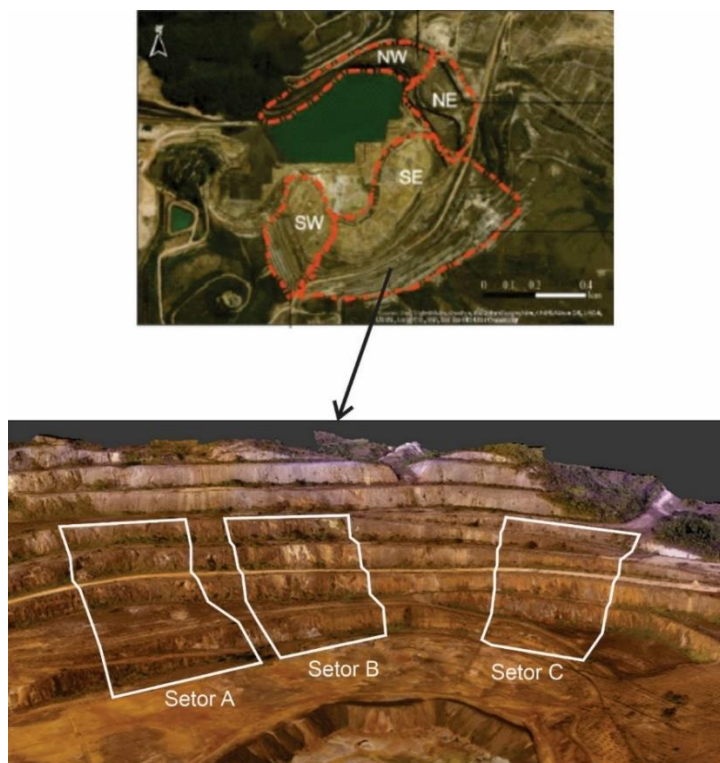
Figura 11: Frente SE com foco nos pontos de instabilidade, sendo as duas primeiras imagens de porções relacionadas à presença de minério residual.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar a porção frontal dos taludes da Frente SE foi possível identificar diferenças no comportamento do maciço exposto e setorizar tais áreas. Desse modo foram detectados três setores com características distintas, denominados de Setor A, Setor B e Setor C. Em características gerais, no Setor A não há percolação de água visível na face do talude e há focos de deslizamentos e instabilidade. O Setor B é o de maior instabilidade, com a presença de minério residual, uma grande ruptura no centro da seção e há percolação de água pelas discontinuidades. Já o Setor C apresenta um grau menor de alteração do maciço e menos pontos de instabilidade (Figura 12).

Figura 12: Vista aérea da cava da mina com a delimitação das Frentes. Em seguida, vista frontal da Frente SE com a delimitação dos setores A, B e C.



Fonte: Autoria própria.

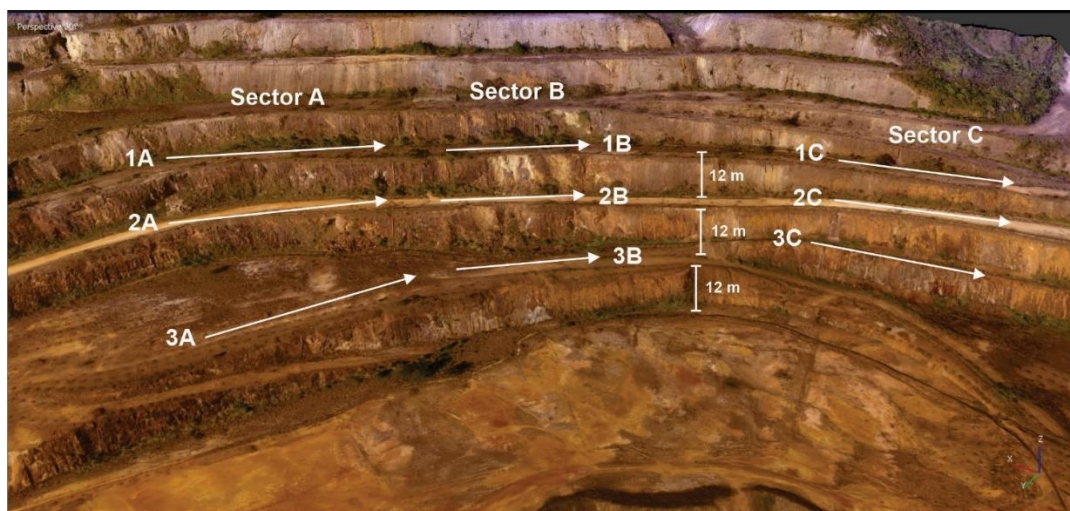
O equipamento utilizado neste trabalho foi o *MALÅ Easy Locator WideRange* com antena de alta faixa dinâmica de 450 MHz e tela acoplada, que mostra as informações obtidas em tempo real de aquisição (Figura 13). Em cada um dos setores da Frente SE foram percorridas 3 bermas (níveis de bancadas), com linhas de aproximadamente 100 metros, de modo que, no total, foram percorridos cerca de 900 metros (Figura 14). Os dados foram obtidos no mês de novembro do ano de 2022.

Figura 13: Equipamento GPR utilizado na investigação da subsuperfície.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14: Bancadas da Frente SE e as linhas percorridas com o GPR.



Fonte: Autoria própria.

O maciço dentro da área de estudos apresenta pouca variabilidade litológica, desse modo foi utilizado o valor de 130 m/ μ s de velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas, alterado através do próprio equipamento. Os resultados da investigação por GPR consistem em radargramas, que correlacionam a distância do ponto inicial com a profundidade de investigação, ambos expressos em metros.

A aquisição com o GPR foi realizada a cerca de 5 metros de distância da borda do talude, de modo que, o radargrama gerado da subsuperfície reflete a superfície exposta do talude. Após a aquisição, foi realizada uma comparação entre os radargramas e a superfície exposta, de forma a correlacionar os pontos mais proeminentes que estavam presentes nas seções geofísicas e nos taludes.

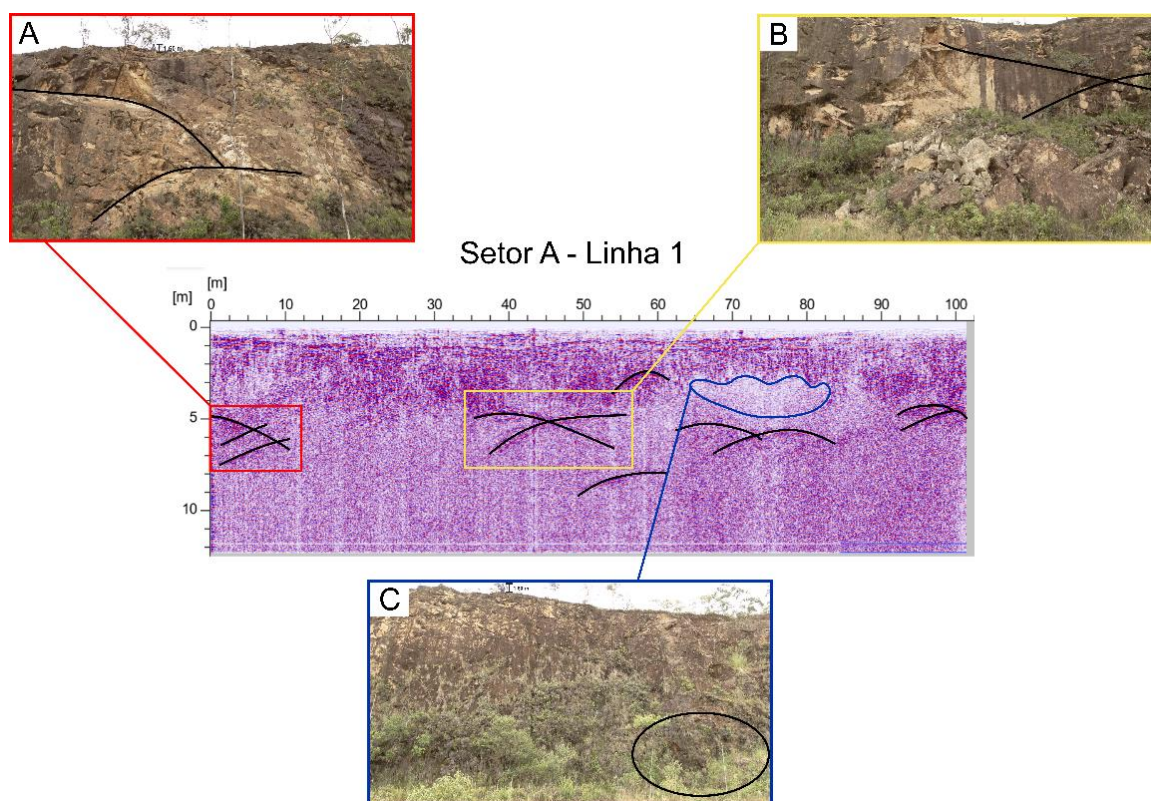
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Frente SE da cava da MOU foi dividida em 3 setores distintos devido às suas disparidades em respeito ao comportamento geotécnico. Dos 3 setores, o A apresenta um comportamento misto em relação a estabilidade, o B é o mais instável de todos e o C é o mais estável.

7.1 SETOR A

O Setor A é caracterizado por certa estabilidade geral e pontos localizados de instabilidade e queda de blocos (Figuras 15, 16 e 17). Nas porções onde o maciço está íntegro são observadas falhas e fraturas, como nas Figuras 16 e 17A, as quais, em outros pontos, podem ser o ponto de partida para a queda de blocos (Figura 15B).

Figura 15: (A) Fraturas visíveis na superfície do talude. (B) Área de queda de blocos em aproximadamente 45 metros. (C) Área com vegetação e possível presença de água na face, entre 70 e 80 metros.



Fonte: Autoria própria.

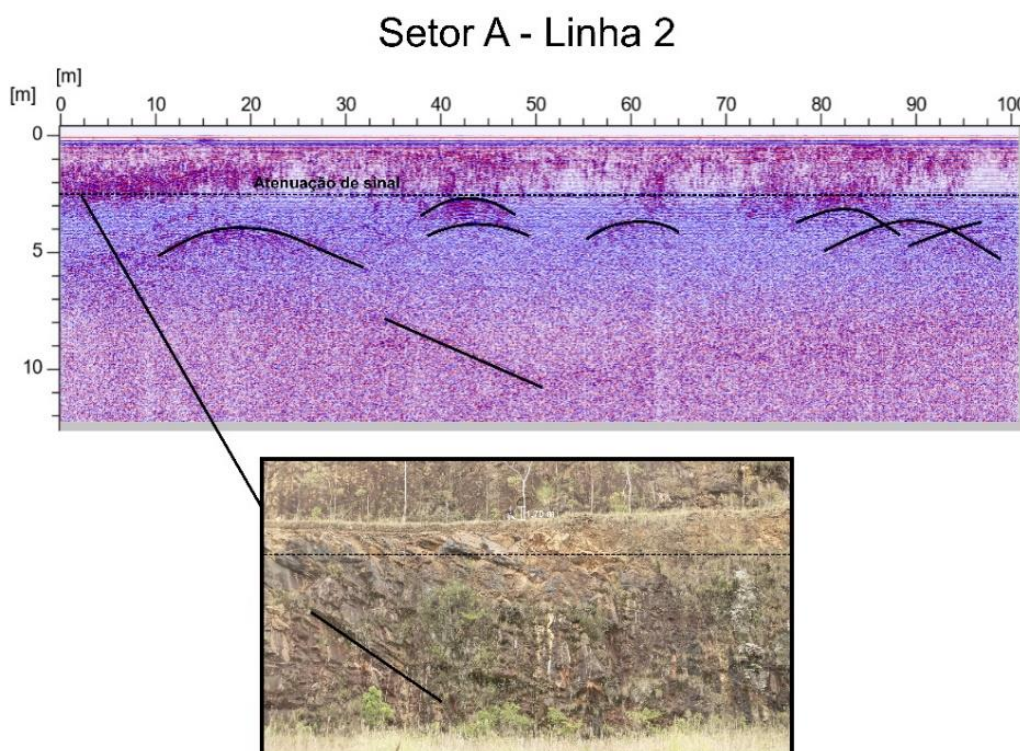
O fluxo de água não é perceptível de modo recorrente na superfície dos taludes do Setor A, portanto água não flui pelas fraturas nessa porção. Contudo, a ausência/atenuação de

sinal nos radargramas indica a presença de água no local, logo, por mais que as fraturas não sejam responsáveis por verter água à superfície, os dados de GPR mostram que o fluído está acumulado no interior do talude.

Na Linha 1 estão os maiores pontos de instabilidade do Setor A (Figura 15). Fraturas são observadas por toda sua extensão, como nas Figuras 15A e 15B, e no segundo caso estão relacionadas à queda de blocos, que se acumulam ao pé do talude. Próximo ao final da seção, por volta de 75 metros, há uma porção de ausência de sinal no radargrama, que foi correlacionada com uma área próxima ao pé do talude, que conta com a presença de vegetação e possível acúmulo de água, não visível (Figura 15C).

No radargrama da Linha 2 é perceptível uma atenuação no sinal que se mantém constante até aproximadamente 2,5 metros de profundidade por toda a seção (Figura 16), associada a presença de água, mesmo sem a presença de fluxo na superfície. Além disso, são perceptíveis ocorrências de deslizamento de pequenos blocos.

Figura 16: Atenuação no sinal até aproximadamente 2,5 metros de profundidade (linha serrilhada), provavelmente dada pela presença de água.

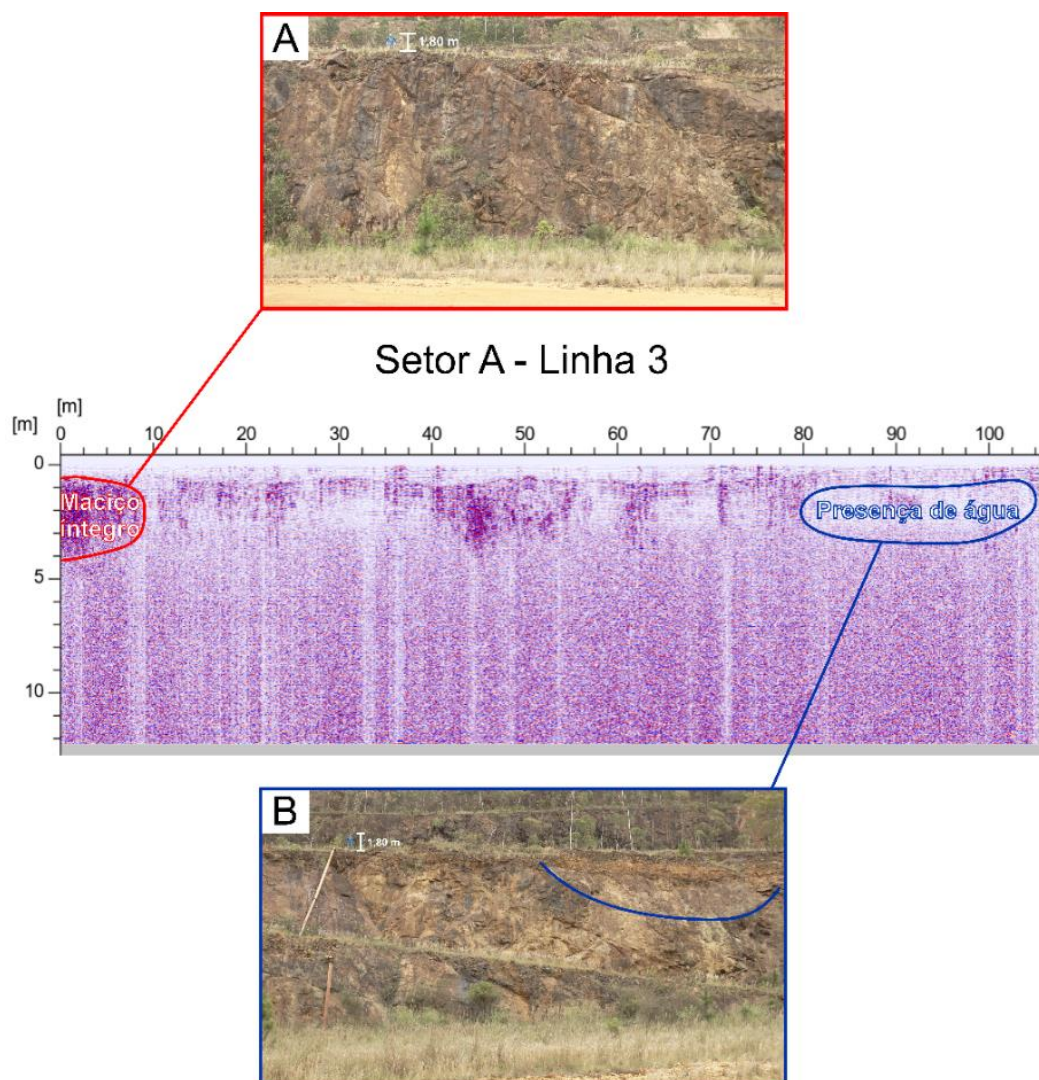


Fonte: Autoria própria.

Na Linha 3 foi observada uma série de fraturas na face do talude analisada na seção, em um maciço praticamente íntegro e pouco alterado (Figura 17A), salve uma pequena

porção no topo do talude ao fim da seção, onde há um foco de deslizamento de bloco provavelmente originado pela percolação de água no interior do maciço (Figura 17B).

Figura 17: (A) Zona inicial caracterizada pelo maciço íntegro. (B) Zona de ruptura onde a rocha está alterada.



Fonte: Autoria própria.

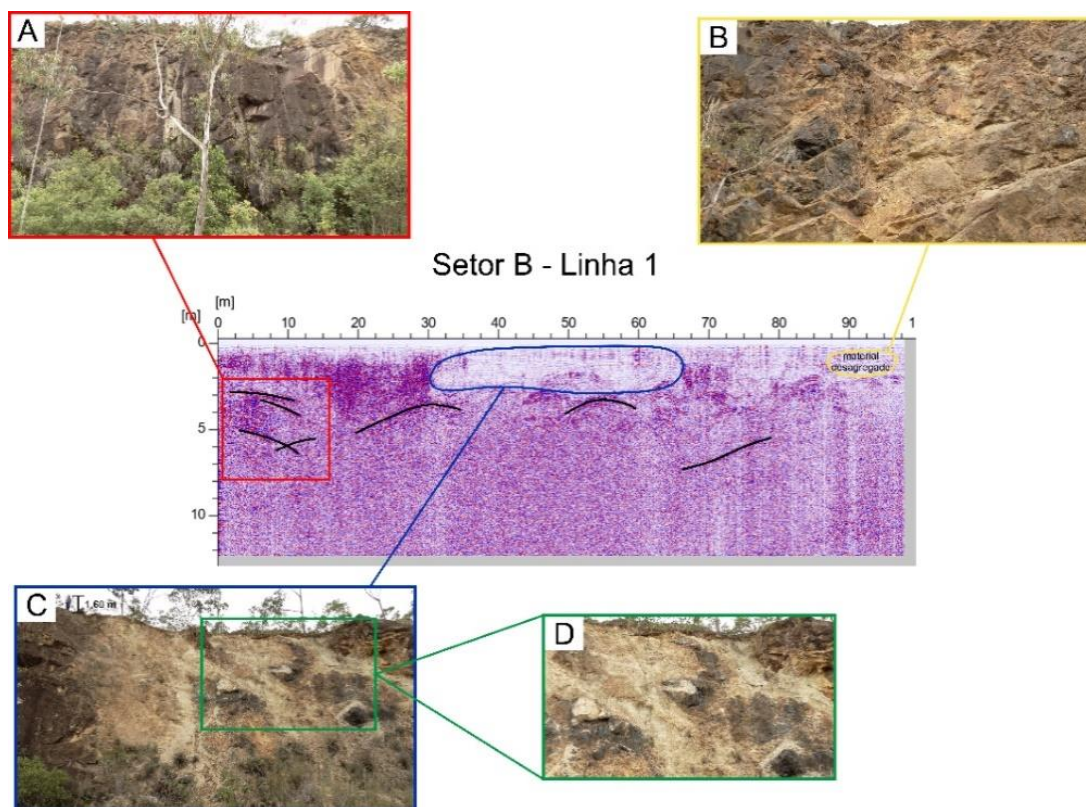
7.2 SETOR B

O Setor B é caracterizado por uma instabilidade generalizada, com grandes escorregamentos e fluxo de água na superfície (Figuras 18, 19 e 20). Na área desse setor o maciço é responsável por hospedar o antigo corpo mineralizado da mina, o qual era o principal foco da extração.

Essa parte ainda apresenta minério residual, que está associado a rochas que sofreram grande alteração, portanto a composição básica dessa porção são argilominerais, responsáveis

por dar à rocha uma coloração mais clara, como observado em detalhe na Figura 18D, e diminuir sua capacidade de agregação.

Figura 18: (A) Zona de maciço fraturado. (B) Zona de material desagregado. (C) Zona de ruptura geral (a maior da Frente SE), com presença de minério residual e grande quantidade de material desagregado acumulado ao pé do talude, juntamente com acúmulo de água. (D) Zona de ruptura em detalhe.



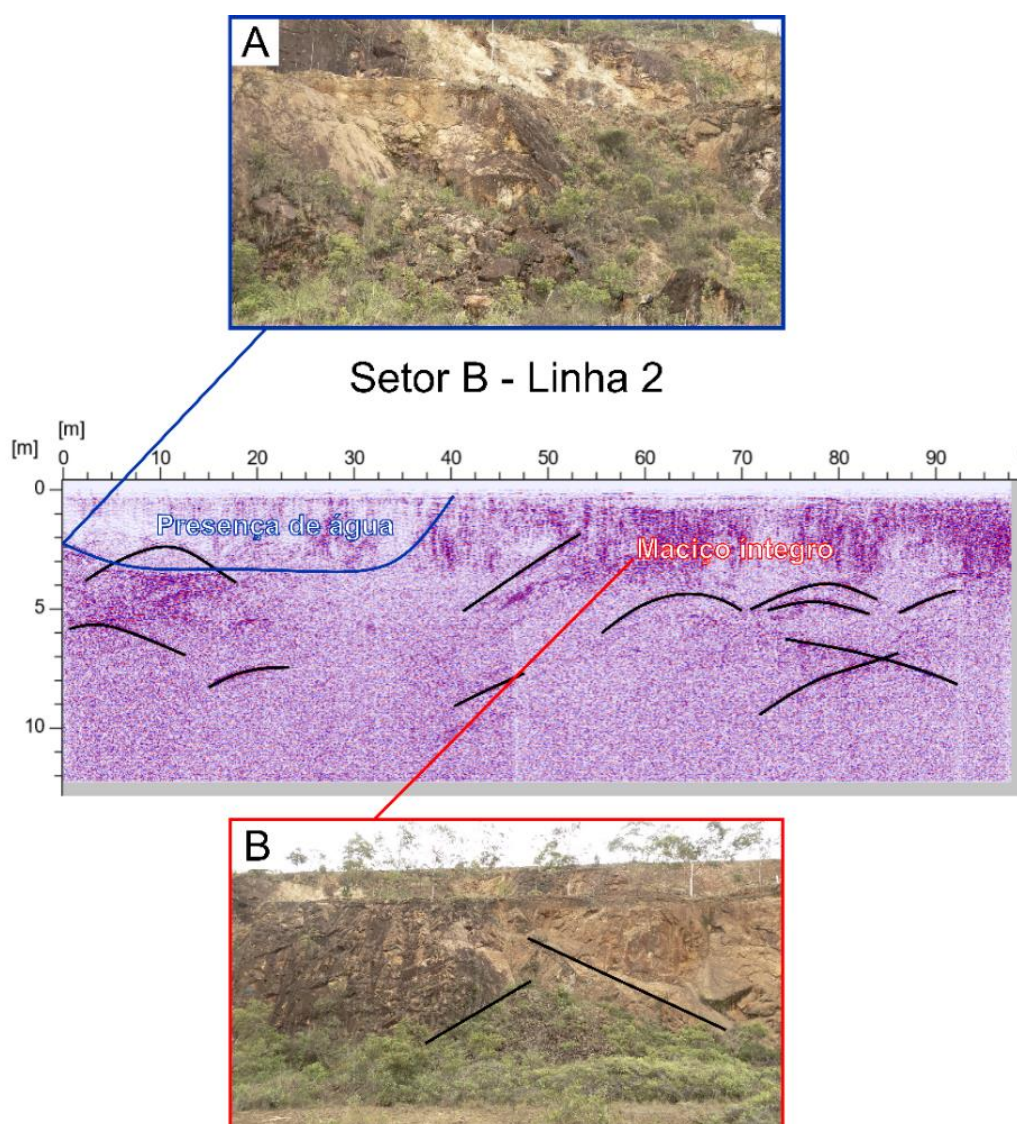
Fonte: Autoria própria.

Nesse setor a presença de água no interior do maciço é evidenciada por fluxos na superfície dos taludes, através de fraturas ou espaços gerados pela desagregação de um bloco. Além disso, presença de diversos pontos de instabilidade e grandes escorregamentos evidenciam a presença de fluxo de fluido no seu interior. Portanto, nesse caso, a presença de água foi constatada tanto pela observação, quanto pelos resultados dos radargramas.

A área abrangida pela Linha 1 é a de maior instabilidade em toda a Frente SE, caracterizada por rupturas gerais e escorregamentos de grandes blocos, que se acumulam ao pé do talude (Figura 18). O fator responsável por essa instabilidade é a zona de minério residual, que apresenta uma coloração mais clara em comparação ao maciço inalterado (Figuras 18B e C). Além disso, a instabilidade também é intensificada pelo fluxo de água, o qual pode ser percebido em fraturas na face do talude, onde há surgência de água (Figura 18A), perceptível também em locais onde houve o deslizamento de um bloco.

No início da Linha 2 (Figura 19), há deslizamentos na parte superior do talude que abrangem até aproximadamente 40 metros da seção, os quais evidenciam o fluxo de água no interior (Figura 19A).

Figura 19: (A) Presença de água evidenciada por deslizamentos no talude. (B) Maciço parcialmente íntegro, com presença de fraturas.



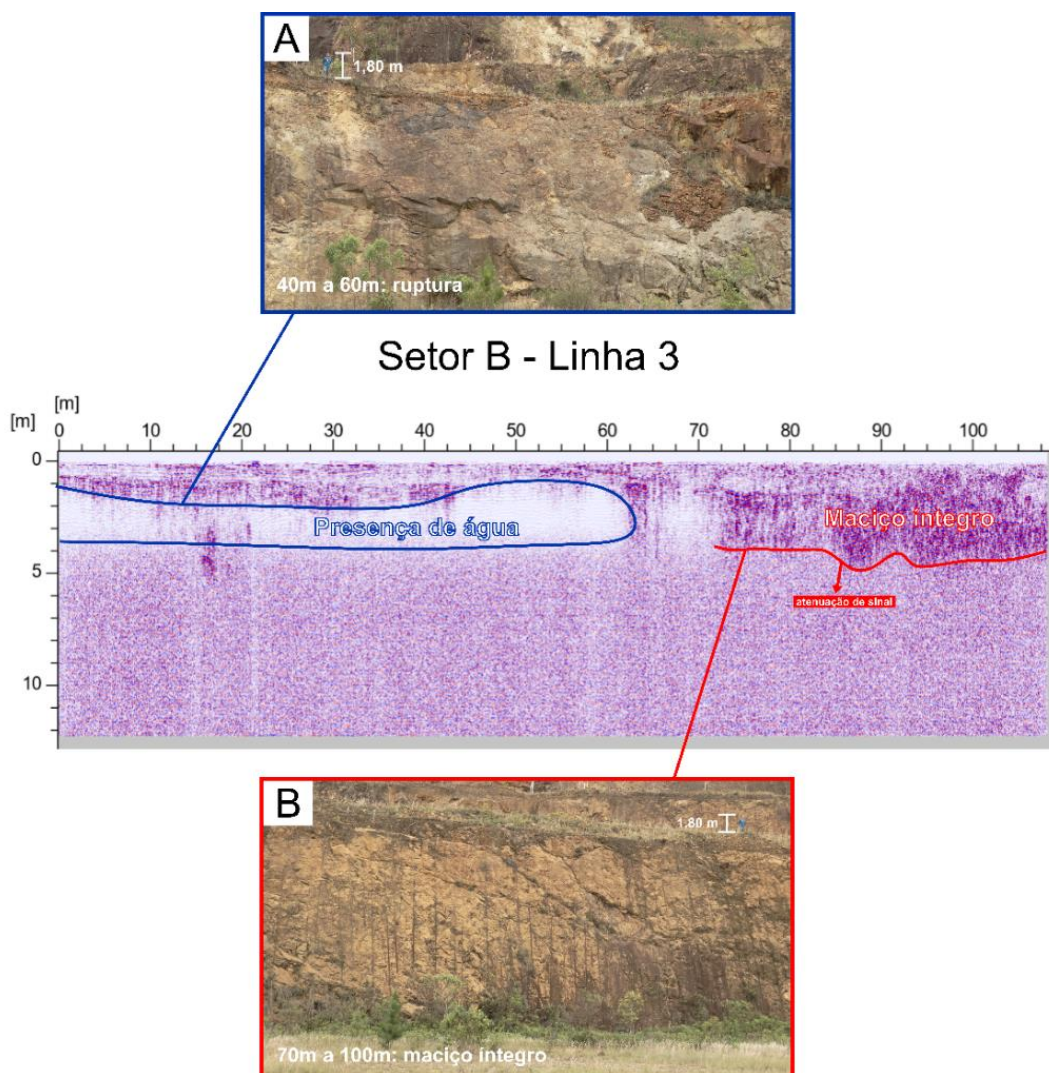
Fonte: Autoria própria.

A partir disso, o maciço tem um comportamento mais estável e inalterado, em contraste as porções anteriores, de modo que mostra sinais de que não há um fluxo significativo de água nessa porção, uma vez que ainda são observadas fraturas na superfície do talude, sem fluxo aparente e os deslizamentos são localizados e de menor abrangência que os observados anteriormente nesse setor.

Os resultados da Linha 3 são semelhantes ao da Linha 2, de forma que apresenta uma ruptura no topo do talude no início da seção, de 40 a 60 metros (Figura 20A), enquanto o

restante se encontra inalterado, de 70 a 100 metros (Figura 20B). Nesse caso, na porção íntegra do maciço ainda são visíveis fraturas na superfície, que não vertem água, porém não há a presença de deslizamentos.

Figura 20: (A) Ruptura generalizada entre 40 e 60 metros. (B) Maciço íntegro de 70 a 100 metros.



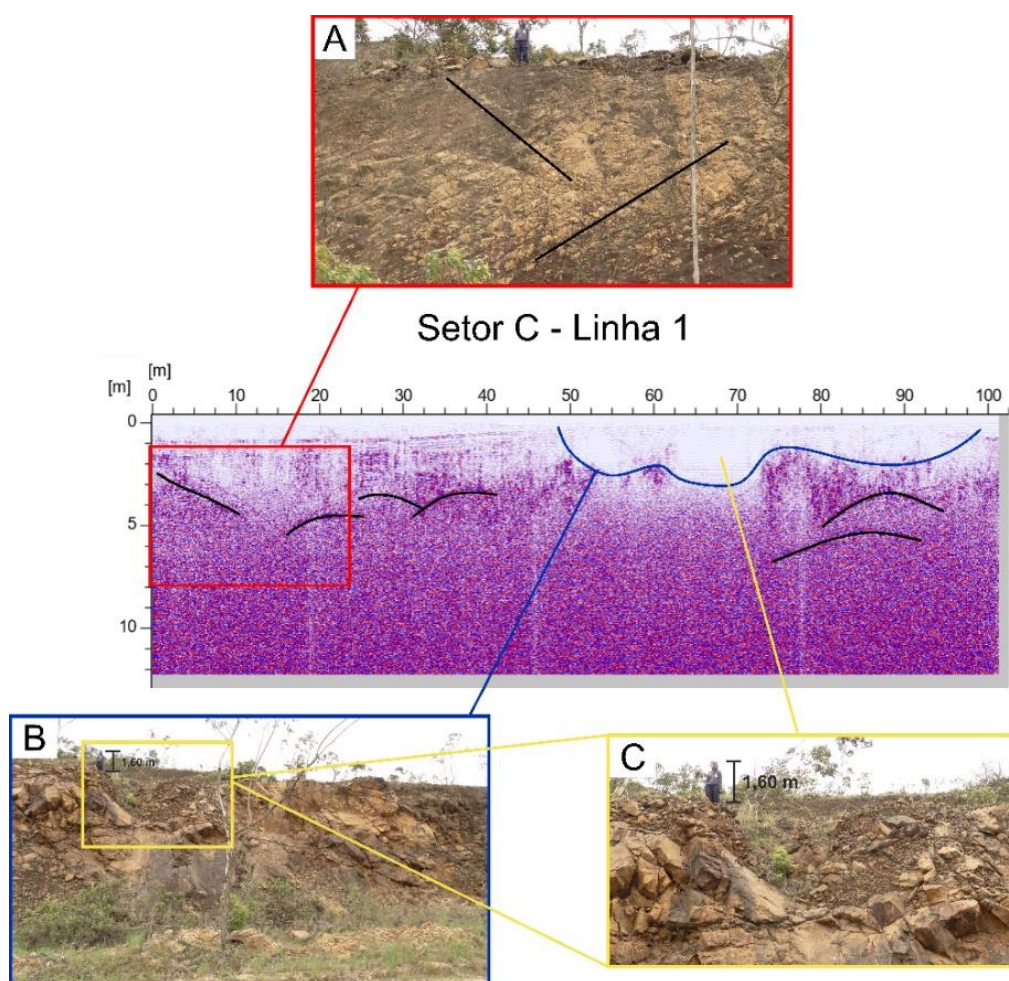
Fonte: Autoria própria.

7.3 SETOR C

O Setor C tem como característica principal uma maior estabilidade em toda sua extensão, com poucos pontos de ruptura que ocorrem isoladamente (Figuras 21, 22 e 23). O fraturamento do maciço é intenso e sem fluxo de água na sua superfície.

A Linha 1 abriga a única ruptura significativa do Setor C, junto da desagregação de alguns blocos menores do meio ao fim da seção (Figuras 21B e C). O início da seção é marcado pela presença de fraturas secas no maciço (Figura 21A).

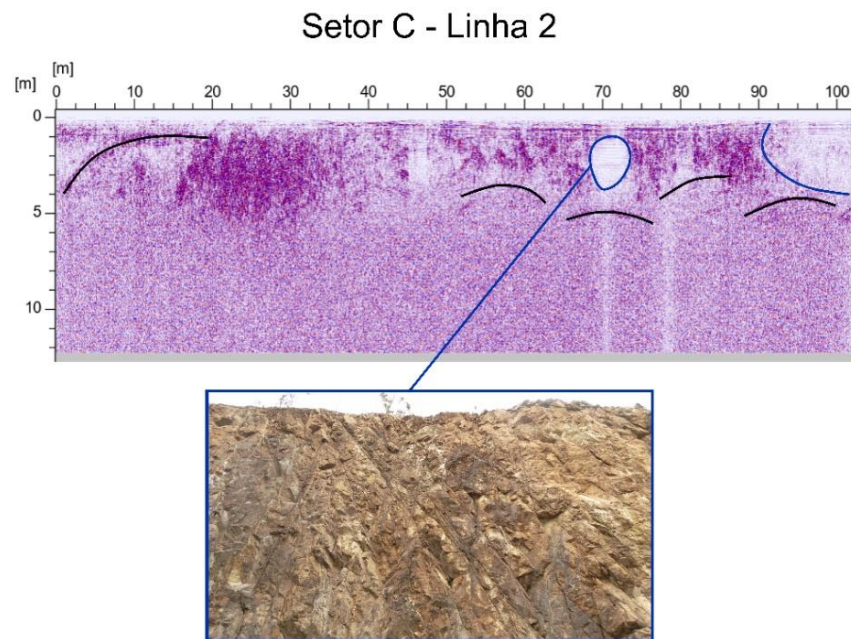
Figura 21: (A) Fraturas visíveis na face do talude. (B) Rompimento na porção superior do talude. (C) Zona de rompimento em maior detalhe.



Fonte: Autoria própria.

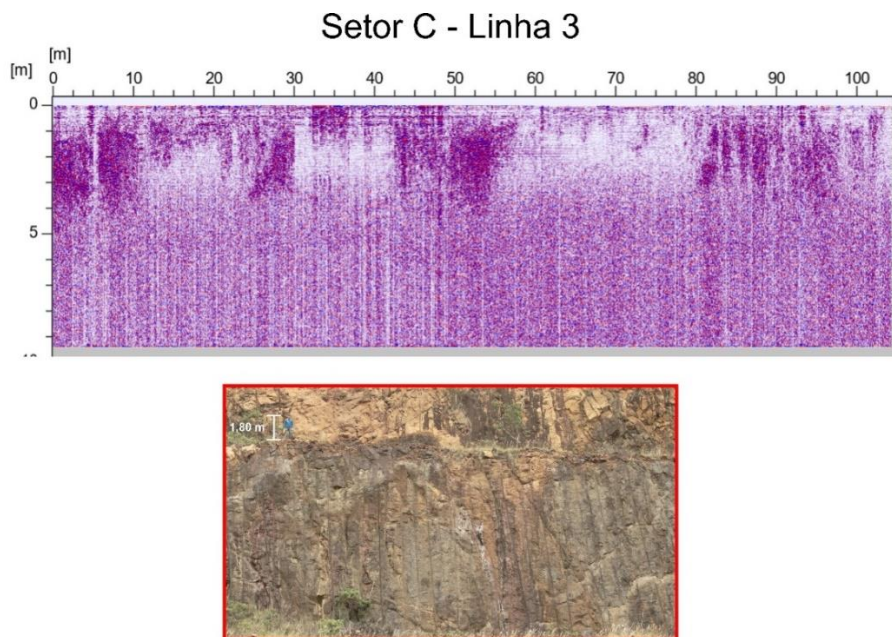
As Linhas 2 e 3 do Setor C apresentam um comportamento parecido, com a ausência de rupturas ou escorregamento de blocos e presença de fraturas na superfície. O radargrama da Linha 2 apresenta alguns pontos de ausência de sinal que correspondem a uma parte intensamente fraturada do maciço, a presença de água no interior pode ser inferida, por mais que não flua pelas fraturas (Figura 22). O radargrama da Linha 3 não apresentou nenhuma feição significativa, o que indica um maciço mais íntegro e menos alterado, mas fraturas ainda se fazem presentes na sua superfície, porém em menor intensidade (Figura 23)

Figura 22: Área do maciço intensamente fraturada. A ausência de sinal pode indicar presença de água.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23: Maciço íntegro. Ausência de fluxo de água.

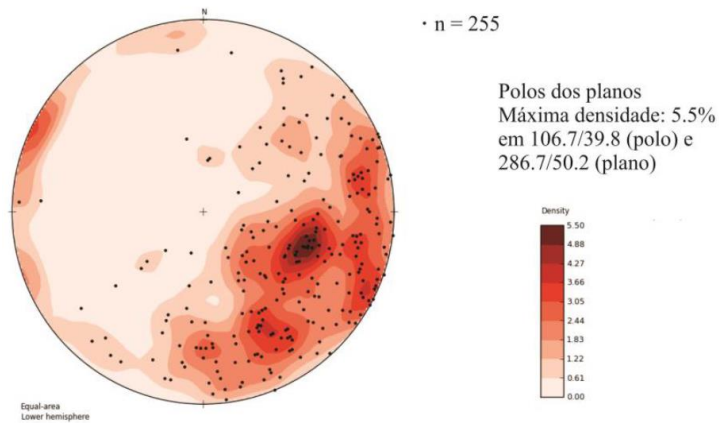


Fonte: Autoria própria.

De acordo com Targa (2018), o talude da Frente SE tem direção NE-SW e mergulho maior que 80° para NW (sendo 50° o valor mais recorrente), com os planos de fratura paralelos ao talude (Figuras 24 e 25). Além disso, o trabalho de Targa constatou que a configuração estrutural da área favorece a movimentação de blocos e que, os planos das

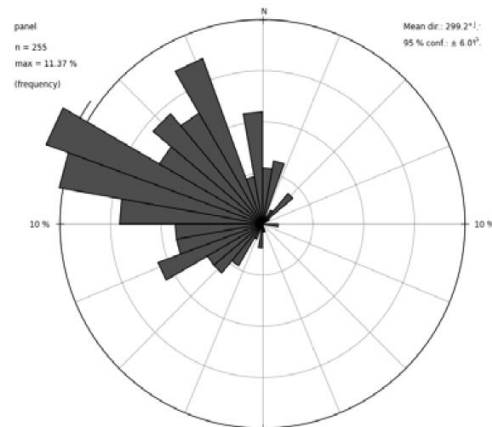
descontinuidades mergulharem a favor do talude evidenciam que o fluxo de água na mina percolam em direção à cava da mina.

Figura 24: Estereograma dos planos de fratura da Frente SE.



Fonte: Targa (2018).

Figura 25: Distribuição das frequências das direções de mergulho da Frente SE.



Fonte: Targa (2018).

O presente estudo corroborou com esses fatos já constatados sobre a área de estudo, uma vez que os perfis GPR mostraram o acúmulo e fluxo de água no interior dos taludes, com ocorrência nas áreas de maior fraturamento e escorregamentos. Dessa forma, é evidenciada a relação entre o fraturamento, fluxo de água e problemas geotécnicos.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A exploração mineral por minas a céu aberto altera significativamente o sistema hidrogeológico local, seja por meio de desvios de canais de drenagem ou por eventuais contaminações à bacia hidrográfica e aquíferos locais, como por exemplo através da geração de drenagem ácida de mina. As detonações para desmonte de rocha implicam na abertura de sistemas fraturados existentes ou mesmo na geração de novos sistemas e, conseqüentemente, geram caminhos preferenciais de fluxo. Neste sentido, zonas de acúmulo de água no interior do maciço fraturado podem em longo prazo implicar em processos de instabilidade geotécnica, uma vez que caminhos foram abertos, ou expandidos, no seu interior e possibilitam a geração dessas zonas de acúmulo.

Este diagnóstico é complexo diante da ausência de evidências em superfície, em contraste com zonas de fluxo autênticos, com surgências em taludes e frentes de lavra, uma clara evidência de descarga e não acúmulo. Neste sentido, estudos geofísicos de detalhe podem revelar estes locais de acúmulo de água e suas relações com zonas de instabilidade em frente de lavra ativas ou em minas em fase de descomissionamento.

Os resultados apontam a relação direta entre acúmulo de água no interior do maciço rochoso e quedas de bloco em frente de lavra, indicativo de lubrificação ou sobrepressões em planos de fratura, com redução no atrito e perda de coesão de blocos. A eventual inexistência destas zonas de acúmulo deve proporcionar um menor risco de liberação de blocos e estabilidade geotécnica, em semelhança às regiões com surgências, relativamente estáveis. Neste sentido, a busca com estabilidade geotécnica requer necessariamente a drenagem constante das zonas de acúmulo, seja por meio de drenos estrategicamente posicionados e que permitem escoamento por gravidade, seja por selagem de zonas de fluxo em fraturas ou mesmo redirecionamento das águas pluviais para redução de infiltração para o interior do maciço rochoso.

Independente da solução mais adequada em termos de exequibilidade técnica e econômica, o estudo de maciços rochosos de forma combinada por diagnóstico geotécnico e geofísico, revelou as regiões problemáticas em subsuperfície e sua conexão com instabilidade geotécnica em superfície. Neste sentido, o estudo demonstra a aplicabilidade destas ferramentas em taludes de maciços rochosos em minerações, rodovias, ferrovias ou dutovias, adequadas em análise previsionais e de redução de riscos econômicos, sociais e ambientais.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Mineração – ANM. 2021. Resolução ANM Nº 68, de 30 de abril de 2021 “Dispõe sobre as regras referentes ao Plano de Fechamento de Mina – PFM”. ANM: Brasília. 5p. <https://portal.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-anm-n-68-de-30-de-abril-de-2021-317640591> , acessado em 03/11/2022.
- ALBERTI, H. L. C. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio – Osamu Utsumi, Planalto de Poços de Caldas (MG). 2017. Tese (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. The upper precambrian of South America. Boletim IG, v. 7, p. 45-80, 1976.
- BIONDI, J. C. 1976. Cubagem e avaliação do depósito de urânio do Cercado (c -09). In: Relatório interno NUCLEBRÁS. Rio de Janeiro, RJ.
- Biondi, João Carlos. Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros. 2ª edição. rev. e atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- CAMARERO, P. L. 2022. Estudo integrado de geofísica e geologia estrutural na identificação de drenagem ácida em mina de urânio. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Campus de Rio Claro. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.
- CAMARERO, P. L.; MOREIRA, C. A.; TARGA, D. A.; DUZ, B. G.; PEREIRA, H. G. Analysis of Acid Drainage Flow Zones in a Rocky Massif in a Uranium Mine from Structural and Geophysical Diagnoses. 2021. Mine Water and the Environment. Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2021.
- CAPOVILLA, M. N. G. M. Urânio nos hidrotermalitos potássicos (“rocha potássica”) da Mina Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG. 2001. 227p. Tese de doutorado em Mineralogia e Petrologia. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 2001.
- CAVALCANTI, et al. Relatório Final de Geologia – Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. Brasília. 1979
- CIPRIANI, M. Mitigation of social and environmental impacts resulting from final closure of uranium mines. Pós-graduação em Geociências. Área de Administração e Política de Recursos Minerais. Universidade Estadual de Campinas – SP, Brasil. 2002.
- CRUZ, W.B.; PEIXOTO, C.A.M. A Evolução química das águas subterrâneas de Poços de Caldas – MG. Revista Brasileira de Geociências, v. 21, cap. 1, p. 23-33,1991
- ELLERT, R. Contribuição à geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. São Paulo, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras – USP, Boletim 237, Geologia 18, p. 5-63. 1959.
- FAGUNDES, J.R.T. Balanço hídrico do bota-fora BF4 da mina Osamu Utsumi, INB, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida. 2005, 121 p. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2005.
- FRAENKEL, M. O.; SANTOS, R. C.; LOUREIRO, F. E. V. L.; MUNIZ, W. S. Jazida de urânio no Planalto de Poços de Caldas – Minas Gerais. Principais depósitos minerais do Brasil, v. 1, Recursos Minerais Energéticos, MME, DNPM e CVRD, Brasília, p. 89-103, 1985.

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. 2007. 358p. Tese de doutorado em ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. 2007.

GARDA, G. M. A alteração hidrotermal no contexto da evolução geológica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. 1990. 262p. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 1990.

Hoek, E., & Bray, J.D. 1974. Rock Slope Engineering: Third Edition (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482267099>

HUDSON, J.A.; HARRISON, J.P. 1997. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. Kidlington: Pergamon. 444p.

LEITE, J. S. M. Previsão de drenagem ácida por meio de testes estáticos do material do bota fora da mina de Osamu Utsumi – Caldas, MG. 2010, 59 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia, Ouro Preto, 2010.

LORENZ, V.; McBirney, A. R.; Willians, H. 1970. An investigation of volcanic depressions: maars, tuffings, tuffcones and diatremes. In: NASA. Research Grant Report NGR 38-003- 012. Houston.

LOUREIRO, F. V. L.; DOS SANTOS, R. C. The intra-intrusive uranium deposits of Poços de Caldas, Brazil. Ore Geology Reviews, v. 3, n. 1-3, p. 227-240, 1988.

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

MIYASAKI, G. S. Plano de recuperação de áreas degradadas – PRAD, RT-006_099-515- 3023_01-J. Parecer Técnico DIFOR número 01/14, 2014

MORAES, Fernanda Tonizza. Zoneamento geoambiental do planalto de Poços de Caldas, MG/SP a partir de análise fisiográfica e pedoestratigráfica. 2007. Tese de Doutorado (Geociências e Meio Ambiente.) – Pós-Graduação, 2007.

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.

RENDU, Jean-Michel. Risk Management in Evaluating Mineral Deposits. Englewood, Colorado: The Society for Mining, Metallurgy & Exploration - SME, 2017. 310 p. ISBN 978-0-87335-448-6.

REYNOLDS, D. L. 1954. Fluidization as a geological process and its bearing on the problem of intrusive granites. Amer.Jour. Sci., New Haven: J.D.& E. S. Dana, v.252.

REYNOLDS J.M. 2011. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons, p. 712.

SANTOS, R. V. Aplicação do método GPR (*ground penetrating radar*) no estudo de vazios em rochas carbonáticas. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Monografia de Bacharelado em Geologia. Universidade Federal da Bahia. 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/32805>.

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. *J. Geochem. Explor.* v. 45, p. 25-51, 1992.

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. *J. Geochem. Explor.* v. 45, p. 25-51, 1992.

SHEA, M.E. Isotopic geochemical characterization of selected nepheline syenites and phonolites from the Poços de Caldas alkaline complex, Minas Gerais, Brazil. Poços de Caldas Report nº 4. In: NAGRA, SKB, UK DOE. Poços de Caldas Project. 1991.

SOUZA, A. M.; SILVEIRA, C. S.; PEREIRA, R. M. Contribuições dos metais provenientes das pilhas de rejeito da Mina Osamu Utsumi a drenagens do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais. *Geochimica Brasiliensis*, 27(1), p. 63-76, 2013.

STRESSER, CLEYTON & BOSZCZOWSKI, ROBERTA & FARO, VÍTOR & PASSINI, LARISSA DE BRUM. 2019. Explorando diferentes abordagens didáticas no primeiro contato dos alunos com geotecnia.

TARGA, Débora Andrade. DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO-GEOTÉCNICO POR MEIO DE ANÁLISE ESTRUTURAL NA MINA OSAMU UTSUMI (POÇOS DE CALDAS – MG). 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação, Geologia) – 2018

ULBRICH, H.H.G.J. A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. 1984, 530 p. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências. São Paulo, 1984.

ULBRICH, H. H.; ULBRICH, M. N. C. O Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP: características petrográficas e estruturais. In: SBG/ Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo. Roteiro de Excursões, p. 64. 1992.

WABER, N. SCHORSCHER, H.D, PETERS, TJ. Hydrothermal and supergene uranium mineralization at the Osamu Utsumi mine, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 45, Issues 1–3, 1992, Pages 53-112.