

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

ANÁLISE ESTRUTURAL E GEOFÍSICA EM MACIÇO FRATURADO DA FRENTE  
DE LAVRA NE DA MINA OSAMU UTSUMI, POÇOS DE CALDAS - MG

Nathássia Moreira Arruda

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Rio Claro (SP)

2018

NATHÁSSIA MOREIRA ARRUDA

**ANÁLISE ESTRUTURAL E GEOFÍSICA EM MACIÇO FRATURADO DA  
FRENTE NE DA MINA OSAMU UTSUMI, POÇOS DE CALDAS – MG**

Trabalho de Conclusão de Curso 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 Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora**

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Doutoranda Fernanda Teles Gomes Rosa

Mestrando Antônio Elton da Silva Lima

---

Assinatura do(a) aluno(a)

---

Assinatura do(a) orientador(a)

Rio Claro, 28 de novembro de 2018.

A779a

Arruda, Nathássia Moreira

Análise Estrutural e Geofísica em Maciço Fraturado da Frente de Lavra NE da Mina Osamu Utsumi, Poços de Caldas - MG / Nathássia Moreira Arruda. -- , 2018

42 p. : il., tabs., fotos, mapas + 1 CD-ROM

Trabalho de conclusão de curso ( - ) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara, Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

1. Polarização Induzida. 2. Resistividade. 3. Geofísica. 4. Drenagem Ácida da Mina (DAM). 5. Maciço Fraturado. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

*“Aí daqueles que pararem com sua capacidade de sonhar,  
de invejar sua coragem de anunciar e denunciar.  
Aí daqueles que,  
em lugar de visitar de vez em quando o amanhã pelo profundo engajamento com o hoje,  
com o aqui e o agora,  
se atrelarem a um passado de exploração e de rotina”*  
(Paulo Freire)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Professor Doutor César Augusto Moreira, que em tempos de indecisão e obscurecimento apresentou-me a luz do entendimento e me orientou no caminho árduo, porém satisfatório, da aquisição de conhecimento. Agradeço por sua dedicação tanto como orientador como professor ao longo da graduação, pois sempre demonstrou dedicação e integridade aos cargos que lhe foram competidos, qualidades estas que valem ser ressaltadas quando praticadas com tanto afínco.

Agradeço também aos seus orientandos que de alguma forma me auxiliaram na execução deste, ao Pedro Camarero e ao Matheus Casagrande pela ajuda e conselhos em campo e à Débora Targa pela companhia, conhecimento e orientações.

O acesso à área de estudos e permissão para coleta dos dados foi primordial para a realização deste trabalho, desta forma sou grata à Indústrias Nucleares do Brasil - INB por tornar real esta idealização.

A minha formação acadêmica apresenta significado além da aquisição de um diploma, representa a formação e consolidação de ideais que surgiram desde meus antepassados, como diria meu pai: “A evolução é constante, no passado seu avô apenas obteve o ensino médio, eu obtive uma graduação em ensino particular e hoje você se forma em uma das melhores faculdades públicas do país”. No futuro espero poder dar aos meus a escolha de ser o que quiserem.

O constante acarreta um preceito de infinito, e de certa forma está atrelado a motivação de seguirmos em função do conjunto. Desta forma meus estimados familiares me estimularam a estar onde estou, a ser quem eu sou. Cada um com sua peculiaridade, minha mãe Iara, guerreira com sua amizade, carinho, companhia e permanente base de apoio; meu pai César, com sua visão, orientação, carinho e acolhimento ; meus irmãos, Milena, Marjorie e César, que, apesar de não estarem perto todos os dias, demostram amor e são minhas motivações para construir uma família forte e unida.

Duas pessoas que tenho imensa gratidão: A vó Ivone e o Felipe, ambos foram exemplos contrastantes, complementares e essenciais para a minha formação. À vó agradeço por sua sabedoria, sempre vigiou e orou por mim, mesmo distante. Ao Felipe, companheiro presente, que não hesitou em apoiar meus sonhos, quando necessário rugiu por mim e quando não, me acalentou em seus braços e em suas filosofias.

Durante esta jornada ganhei dois presentes, Ana e Juliana, pessoas que acompanharam nesta jornada de se tornar geóloga. Amigas que ouviram, apoiaram, discordaram (e como discordamos!), choraram e riram nas horas mais inesperadas.

A todos deixo meus agradecimentos e sorriso. Muito obrigada!

## RESUMO

A atividade mineira é um agente de intensa influência no meio ambiente, visto que a extração mineral acarreta na instabilidade físico-química das rochas recém expostas às condições atmosféricas. A formação de Drenagem Ácida da Mina (DAM) é uma problemática frequente em minerações de rochas sulfetadas. A interação entre a água da chuva, o oxigênio presente na atmosfera e o sulfeto contido na rocha resulta na formação de ácido sulfúrico, que acidifica o meio e contribui para a mobilidade de metais pesados como Fe, Mn, Zn, Cu, U, entre outros. Este estudo ocorreu no contexto geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, e teve como objetivo reconhecer o fluxo hidrogeológico do maciço rochoso fraturado que compõe a frente NE da lavra a céu aberto da Mina Osamu Utsumi (MOU), que explotou óxido de urânio associado a sulfetos disseminados em meados dos anos 90 e hoje a MOU apresenta geração de DAM que impede seu descomissionamento. A análise combinada dos métodos geofísicos de eletrorresistividade e polarização induzida associada à análise estrutural foi utilizada para delimitar as zonas saturadas concomitantes às áreas sulfetadas que dão origem à atual DAM. A análise estrutural do maciço indicou seu fluxo associado à presença de conectividade de fraturas. Com os dados geofísicos coletados em campo, foram elaborados perfis e bloco-diagramas que permitiram visualizar e interpretar as relações entre as zonas anômalas, de forma que as zonas de baixa resistividade que apresentaram valores inferiores a  $126 \Omega.m$  associada e as zonas de alta cargabilidade apresentaram valores superiores a  $6,5 \text{ mV/V}$  definiram os locais de geração de DAM.

Palavras-Chaves: Resistividade, Polarização Induzida, Geofísica, Drenagem Ácida da Mina, Maciço fraturado.

## ABSTRACT

The mining activity is an agent of intense influence in the environment, since the mineral extraction entails in the physical-chemical instability of the rocks recently exposed to the atmospheric conditions. The formation of Acid Mine Drainage (AMD) is a frequent problem in mining sulphide rocks. The interaction between rainwater, oxygen in the atmosphere and sulfide contained in the rock results in the formation of sulfuric acid, which acidifies the surroundings and contributes to the mobility of heavy metals such as Fe, Mn, Zn, Cu, U, among others. The study was carried out in the geological context of the Maciço Alcalino de Poços de Caldas, and its objective was to identify the hydrogeological flow of the fractured rock mass that constitutes the NE open mining front of the Osamu Utsumi Mine (MOU), which exploited the uranium oxide associated to disseminated sulphides in the mid 90's, and today MOU presents a series of AMDs that prevent its decommissioning. A combined analysis of the geophysical methods of electroresistance and induced polarization associated with a structural analysis was used to delimit the saturated zones concomitants to the sulfide areas that originates the current AMD. A structural analysis of the massif indicated that its flow is associated with the presence of fracture connectivity. With the geophysical data collected in the field, profiles and block diagrams were elaborated and allowed the visualization and interpretation of the relations between the anomalous zones, so that the zones of low resistivity that presented values inferior to 126  $\Omega$ .m and the zones of high chargeability with values greater than 6.5 mV/V defined the sites of generation of AMD.

**Keywords:** Resistivity, Induced Polarization, Geophysics, Acid Mine Drainage (AMD), Fractured Rock Mass.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- FIGURA 1:** LOCALIZAÇÃO DA CAVA DESATIVADA DA MINA OSAMU UTSUMI A SUDESTE DO COMPLEXO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS..... 4
- FIGURA 2:** VISTA AÉREA DO ENTORNO DA CAVA DA MINA OSAMU UTSUMI, LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE POÇOS DE CALDAS – MG, AO CENTRO ESTÁ LOCALIZADA A CAVA DESATIVADA, A LESTE O BOTA FORA – 4 (BF), A NOROESTE O CÓRREGO DO CERCADO E A NORDESTE O CÓRREGO DA CONSULTA..... 5
- FIGURA 3:** MAPA GEOLÓGICO REGIONAL DO MACIÇO ALCALIN DE POÇOS DE CALDAS. ADAPTADO POR ALBERTI (2017) DE FRAENKEL *ET AL* (1985)..... 8
- FIGURA 4:** VISTA AMPLA DA CAVA EM DESCOMISSIONAMENTO ONDE FOI POSSÍVEL OBSERVAR O SOLO LATERÍTICO FORMADO NO PERFIL DE ALTERAÇÃO DA ROCHA. .... 11
- FIGURA 5:** MODELOS DOS MECANISMOS DE ABERTURA: (I) OPENNING; (II) SLIDING E (III) TEARING. FONTE: (PASTORE E MIOTO, 2000)..... 12
- FIGURA 6:** *PROCESSO DE FORMAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA EM PILHA DE REJEITO (YANFUL E ST-ARNAUD, 1990, CITADO POR PASTORE E MIOTO, 2000).* .... 14
- FIGURA 7:** MODELO DE FLUXO HIDRÁULICO EM UMA FALHA NORMAL COM FORMAÇÃO DE ZONAS IMPERMEÁVEIS DE BRECHA NO PLANO DE CISALHAMENTO. O FLUXO SEGUE NA DIREÇÃO DE FRATURAS E MICROFRATURAS SUBVERTICAIS, FONTE: (FIORI & WANDERESSEN, 2014)..... 17
- FIGURA 8:** ARRANJO SCHLUMBERGER PARA MEDIDAS DE RESISTIVIDADE. FONTE: KNÖDEL *ET AL.*, 2007. .... 18
- FIGURA 9:** POLARIZAÇÃO DE ELETRODO/METÁLICA À ESQUERDA E POLARIZAÇÃO DE MEMBRANA NA DIREITA. (A) FLUXO ELETROLÍTICO LIVRE EM UM CANAL ABERTO; (B) POLARIZAÇÃO DE UM GRÃO ELETRONICAMENTE CONDUTOR, QUE BLOQUEIA UM CANAL; (C) UMA CONSTRIÇÃO DENTRO DE UM CANAL ENTRE GRÃOS MINERAIS; E (D) PARTÍCULAS DE ARGILA NEGATIVAMENTE CARREGADAS (FRASER *ET AL.*, 1964) E ELEMENTOS FIBROSOS AO LONGO DOS LADOS DE UM CANAL.POLARIZAÇÃO DE MEMBRANA ..... ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
- FIGURA 10:** CONFIGURAÇÃO DOS ELETRODOS PARA APLICAÇÃO DO ARRANJO SCHUMBERGER. FONTE: (KEAREY *ET AL.*, 2002)..... 21

- FIGURA 11:** DISPOSIÇÃO DAS TRÊS LINHAS DE AQUISIÇÃO DOS DADOS DE RESISTIVIDADE E DA CARGABILIDADE NO CORPO DE ESTUDO. IMAGEM DE SATÉLITE EXTRAÍDA DO PROGRAMA GOOGLE EARTH EM ABRIL DE 2018..... ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
- FIGURA 12:** (A) RESISTIVÍMETRO DA MARCA TERRAMETER LS (ABEM – SUÉCIA), EQUIPAMENTO UTILIZADO NA CAPTAÇÃO DE DADOS DE DADOS GEOFÍSICOS. (B) LINHA DE AQUISIÇÃO DE DADOS REALIZADA NA SUPERFÍCIE DO DIVISOR DE ÁGUAS QUE COMPÕES A FRENTE DE LAVRA NE DA MOU ..... **25**
- FIGURA 13:** (A) LEVANTAMENTO DE DADOS ESTRUTURAS EM CAMPO, REALIZADO NA FRENTE DE LAVRA NE DA MOU. (B) EM VERMELHO ESTÃO DESTACADAS A FAMÍLIAS DE FRATURAS DAS QUAIS FORAM COLETADAS AS ORIENTAÇÕES E MERGULHOS. É POSSÍVEL OBSERVAR O REGISTRO DA ALTERAÇÃO CAUSADA NAS ÁREAS DE MAIOR ESCOAMENTO DO FLUXO HÍDRICO, PRÓXIMO AOS EIXOS FORMADOS A PARTIR DA INTERSECÇÃO DE DOIS PLANOS DE FRATURAS. .... **27**
- FIGURA 14:** ESTEREOGRAMA COM OS 150 POÇOS DAS MEDIDAS COLETADAS EM CAMPO, QUE INDICA O A ORIENTAÇÃO PREFERENCIAL DAS FRATURAS PARA N-S E APRESENTA CONCENTRAÇÃO DE POLOS EM TORNO DE 55°. ELABORADOS NO SOFTWARE OPEN STEREO. .... **28**
- FIGURA 15:** PERFIS ELABORADO NO *SOFTWARE* RES2DINV REFERENTES À LINHA 1, RESULTANTE DA AQUISIÇÃO DE DADOS DE RESISTIVIDADE E CARGABILIDADE, RESPECTIVAMENTE. EM PRETO ESTÁ DESTACADA A ZONA DE BAIXA RESISTIVIDADE (INFERIORES A 126  $\Omega$ .M) E EM CINZA AS ZONAS DE ALTA CARGABILIDADE (SUPERIORES A 6,5 mV/V). NELE É POSSÍVEL OBSERVAR QUE OS PARÂMETROS ANALISADOS APRESENTAM ANOMALIAS NA MESMA POSIÇÃO..... **29**
- FIGURA 16:** PERFIS ELABORADO NO *SOFTWARE* RES2DINV REFERENTES À LINHA 2, RESULTANTE DA AQUISIÇÃO DE DADOS DE RESISTIVIDADE E CARGABILIDADE, RESPECTIVAMENTE. EM PRETO ESTÁ DESTACADA A ZONA DE BAIXA RESISTIVIDADE (INFERIORES A 126  $\Omega$ .M) E EM CINZA AS ZONAS DE ALTA CARGABILIDADE (SUPERIORES A 6,5 mV/V). A SUDESTE É POSSÍVEL OBSERVAR A GERAÇÃO DE DAM COM FLUXO DESCENDENTE..... **30**
- FIGURA 17:** PERFIS ELABORADOS NO *SOFTWARE* RES2DINV REFERENTES À LINHA 3, RESULTANTE DA AQUISIÇÃO DE DADOS DE RESISTIVIDADE E CARGABILIDADE, RESPECTIVAMENTE. EM PRETO ESTÁ DESTACADA A ZONA DE BAIXA RESISTIVIDADE (INFERIORES A 126  $\Omega$ .M) E EM CINZA AS ZONAS DE ALTA CARGABILIDADE (SUPERIORES A 6,5 mV/V). A SUDESTE É OBSERVADO A REGIÃO DE MAIOR DESLOCAMENTO DA DAM GERADA, COM ABASTECIMENTO SUPERFICIAL E FLUXO GRAVITACIONAL ORIENTADO PELA CONEXÃO ENTRE AS FRATURA. .... **31**

**FIGURA 18:** BLOCO-DIAGRAMAS FORMADOS A PARTIR DA INSERÇÃO DOS DADOS NA PLATAFORMA OASIS MONTAJ GEOSOFT, (A) REPRESENTA OS DADOS DE RESISTIVIDADE E (B) OS DADOS DE CARGABILIDADE..... **33**

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1:</b> RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE RESISTIVIDADE E DE CARGABILIDADE E SUAS INTERPRETAÇÕES.....	<b>29</b>
--	-----------

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b><u>OBJETIVO</u></b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b><u>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS</u></b>	<b>4</b>
3.1	<b>A MINA OSAMU UTSUMI</b>	<b>4</b>
3.2	<b>GEOLOGIA REGIONAL</b>	<b>5</b>
3.2.1	<i>O MACIÇO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS</i>	<b>6</b>
3.2.2	<i>EVOLUÇÃO METALOGENÉTICA DO MACIÇO</i>	<b>9</b>
3.3	<b>GEOLOGIA DA MINA OSAMU UTSUMI</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b><u>PASSIVO AMBIENTAL SUBTERRÂNEO</u></b>	<b>12</b>
4.1	<b>SISTEMA AQUIFEROS FRATURADOS</b>	<b>12</b>
4.2	<b>DRENAGEM ÁCIDA DA MINA (DAM)</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b><u>MÉTODOS E MATERIAIS</u></b>	<b>16</b>
5.1	<b>ANÁLISE ESTRUTURAL</b>	<b>16</b>
5.2	<b>MÉTODOS GEOFÍSICOS</b>	<b>17</b>
5.2.1	<i>MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE (ER)</i>	<b>17</b>
5.2.2	<i>MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA (IP)</i>	<b>18</b>
5.2.3	<i>TÉCNICAS E ARRANJOS</i>	<b>21</b>
5.2.3.2	<i>ARRANJO SCHLUMBERGER</i>	<b>21</b>
5.3	<b>APLICAÇÕES DA PROSPECÇÃO GEOFÍSICA ASSOCIADA A ANÁLISE ESTRUTURAL</b>	<b>22</b>
5.4	<b>AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS</b>	<b>23</b>
5.4.1	<i>LEVANTAMENTO DOS DADOS ESTRUTURAIIS</i>	<b>23</b>
5.4.2	<i>AQUISIÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS</i>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b><u>RESULTADOS</u></b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b><u>CONCLUSÕES</u></b>	<b>35</b>
	<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b>	<b>37</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O papel de uma mineração interfere fortemente em fatores socioeconômicos de uma nação, sua atividade promove desenvolvimento regional na forma de empregos, assistencialismo social além de ser responsável por 1,4% do PIB nacional (IBRAM, 2018), o que é de grande influência na base da economia do país. No entanto este tipo empreendimento também pode gerar grande interferência no meio ambiente, devido sua intensa atividade de extração de recursos minerais e sua inevitável alteração geomorfológica. Uma forma corriqueira desta influência é a alteração do fluxo hidrogeológico nos arredores e sua possível contaminação, gerada pela alteração da mobilidade de elementos químicos e a interação destes elementos com as novas condições físico-químicas presentes nos produtos da atividade mineira.

Zonas mineralizadas por sulfetos localizadas em subsuperfície apresentam equilíbrio físico-químico natural, sem contato com ambiente úmido oxidante. No entanto, ao serem exploradas à superfície, ficam susceptíveis aos agentes intempéricos e seus minerais tendem a entrar em equilíbrio novamente, de acordo com as condições supérgenas. Desta forma, os corpos sulfetados em contato com o ar e a água sofrem dissolução e liberam íons de enxofre no sistema, o que contribui para a formação de ácido sulfúrico, este evento é conhecido como drenagem ácida da mineração (DAM) (ALMEIDA *et al*,1981). Algumas rochas apresentam minerais que contém elementos de alta mobilidade em ambiente ácido. Deste modo, ao serem percoladas pelas soluções geradas na DAM, pode ocorrer solubilização de metais pesados como Mn, Cr, Cd, Zn, Pb, As, Ni, Cu, U e outros, o que permite a contaminação do fluxo hidrogeológico. Neste contexto, cavas de minerações são zonas naturais de acúmulo de DAM por ação da gravidade, devido apresentarem cotas rebaixadas em comparação às cotas do relevo ao redor.

O descomissionamento de uma mineração envolve deveres socioambientais que visam a reabilitação do meio ambiente. Para isto é elaborado um Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD), no qual são estabelecidos parâmetros aceitáveis para o completo descomissionamento da mina. Enfrentar as questões geradas pela DAM, a compreensão do padrão do fluxo hidrogeológico e sua interação com áreas de acúmulo de sulfetos são essenciais para o cumprimento do PRAD.

Aquíferos em maciços fraturados são ambientes propícios para a geração de DAM e apresentam alta complexidade estrutural devido a presença de descontinuidades

principais, como falhas e diques, e secundárias, como juntas e contatos litológicos (VARGAS, 2001). O estudo geoquímico em maciços fraturados requer o conhecimento prévio do fluxo hidrogeológico em subsuperfície para a locação de poços de controle, de forma que a coleta do material seja feita no local adequado. Levantamentos geofísicos auxiliam na compreensão de zonas preferenciais de fluxos e em modelamentos hidrogeológicos de aquíferos fraturados e granulares. O reconhecimento de zonas sulfetadas é um desafio adicional, mas que também pode ser abordado por meio de estudos geofísicos.

Diante do exposto, o presente trabalho visa a análise estrutural e geofísica do maciço rochoso que constitui a frente NE da mina de óxido de urânio Osamu Utsumi (MOU) em fase de descomissionamento com problemas de drenagem ácida, numa tentativa de reconhecimento das zonas de fluxo preferenciais no interior de maciço fraturado. Serão utilizados os métodos geofísicos de Eletrorresistividade para diagnóstico hidrogeológico e de Polarização Induzida para o reconhecimento de áreas com acumulação de sulfetos no interior do maciço.

## **2 OBJETIVO**

O trabalho objetiva o reconhecimento do fluxo hidrogeológico em maciço fraturado que constitui a frente de lavra de uma mina de urânio desativada, por meio de análises estruturais e levantamento geofísico a partir de tomografia elétrica.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

#### 3.1 A Mina Osamu Utsumi

Localizada a sudoeste do estado de Minas Gerais a Mina de urânio Osamu Utsumi (MOU) está inserida no Complexo Minerio-industrial de Poços de Caldas (CIPC), a sudeste do Município de Poços de Caldas – MG e a nordeste do Ribeirão da Antas, como mostra a Figura 1.

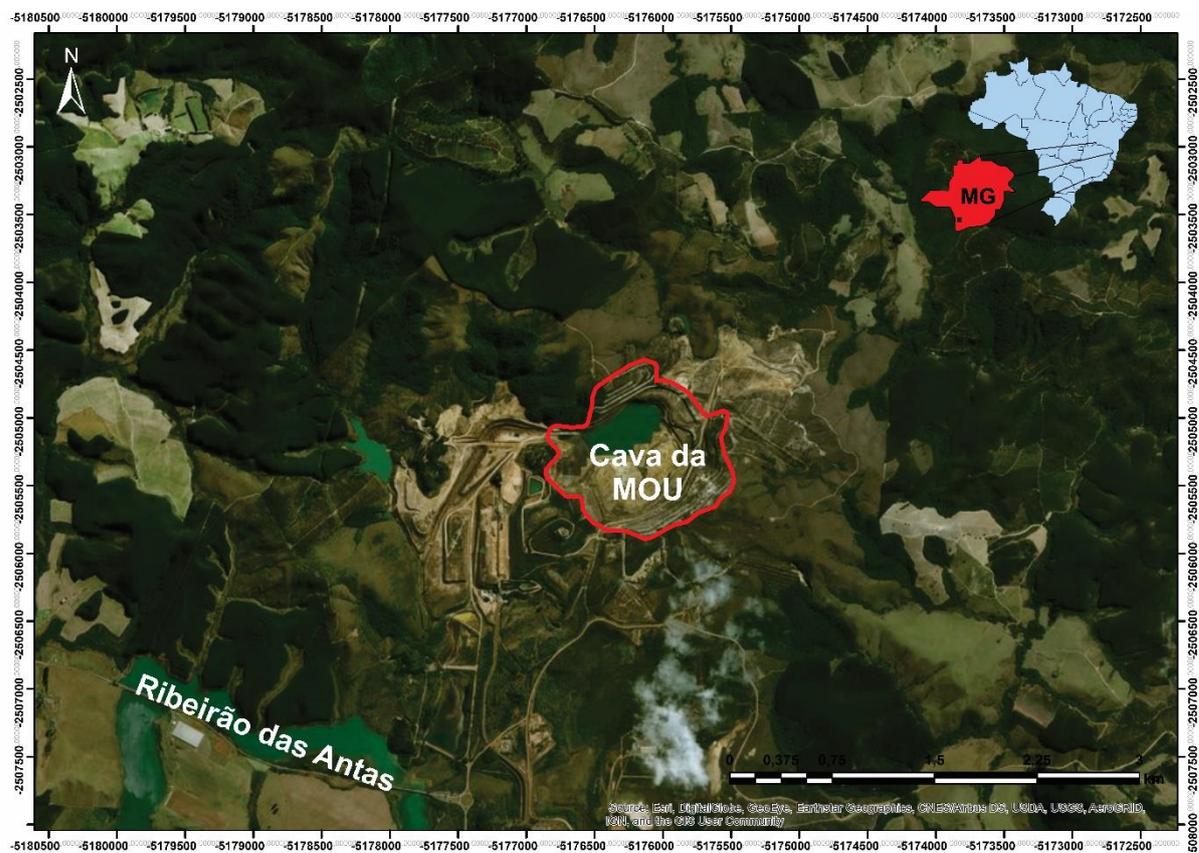


Figura 1: Localização da cava desativada da Mina Osamu Utsumi a sudeste do Complexo Alcalino de Poços de Caldas. Fonte: Autoria Própria.

A descoberta de urânio na região do Maciço Alcalino de Poços de Caldas data 1948 (FRANKLIN, 2007), no entanto apenas em meados dos anos 70, ocorreram investimento na busca de novas matrizes energéticas. Motivado pela inesperada crise do petróleo, a busca por novas fontes movimentou a diretriz nacional, que voltou seus recursos e investimentos para geração de energia nuclear (CIPRIANI, 2002).

Em 1988 foi implantada a Nuclebrás – Empresas Nucleares do Brasil S.A, com intuito de consolidar o Acordo Nuclear Brasil - Alemanha. 27 anos após o início

atividades de pesquisas e prospecções na região do Campo do Cercado, região sul do Planalto de Poços de Caldas, em 1994, a INB – Indústrias Nucleares do Brasil S.A. foi denominada a responsável pela administração do CIPC, assim como por todas as atividades do ciclo do combustível nuclear no país (WIJKMANN, 1998).

A Figura 2 destaca a área de estudo desse trabalho, que consiste no maciço rochoso que estrutura um divisor de águas e que compõe a antiga frente de lavra nordeste da MOU. Sua associação mineral e o fato de o corpo de estudo estar localizado entre dois sistemas de drenagem podem sugerir contaminação do fluxo hidrogeológico subterrâneo, o que permite a investigação da sua influência tanto para a cava quanto para o Bota fora 4 (BF-4), local onde foi depositado o material rochoso extraído da cava e considerado estéril (NOBREGA; LIMA; LEITE, 2008).



Figura 2: Vista aérea do entorno da cava da Mina Osamu Utsumi, localizada no município de Poços de Caldas – MG, Ao centro está localizada a cava desativada, a leste o Bota Fora – 4 (BF), a noroeste o Córrego do Cercado e a nordeste o Córrego da Consulta. Fonte: Autoria própria

### 3.2 Geologia Regional

Alojado na Faixa de Dobramentos Brasília, na divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, o Maciço Alcalino de Poços de Caldas (MAPC) comporta rochas que

constituem uma estrutura circular com diâmetro de aproximadamente 33 km e uma área estimada em 800km<sup>2</sup> num alto topográfico com cotas acima dos 1400m (ULBRICH, 1984). Sua gênese é associada à partição do Continente Gondwana, ao rifteamento ocorrido entre as placas Sulamericana e Africana (ALMEIDA *et al.*, 1981).

### 3.2.1 O Maciço Alcalino de Poços de Caldas

A Mina Osamu Utsumi (MOU) compreende rochas do Complexo Alcalino de Poços de Caldas associadas a estrutura vulcânica alcalina, denominada de Maciço de Poços de Caldas. O Planalto consiste em uma estrutura vulcânica alcalina e abrange parte dos municípios de Poços de Caldas, Caldas, Andradas e Águas de Prata, sua formação é compreendida a partir de uma série de intrusões que evoluíram em pulsos policíclicos distribuídos nas regiões sudeste e central do Brasil. Considerada uma das maiores ocorrências de magmatismo alcalino registradas no mundo, o Complexo Alcalino de Poços de Caldas apresenta gênese relacionada a reativação da fragmentação do Gondwana na Plataforma Sul-Americana, que atingiu seu ápice no Cretáceo.

Por apresentar caráter alcalino, as rochas presentes na área de estudos abrangem um leque de nefelina-sienitos como tinguaitos, fonólitos e foiaítos. São rochas que apresentam enriquecimento de urânio através de processos hidrotermais e supergênicos que originam mineralizações primárias e secundárias, respectivamente (FRANKLIN, 2007). Desta forma, a mineralogia encontrada na mina é composta por uraninita/pitchblenda associada a brechas, jordisita, pirita, esfalerita, galena e fluorita.

Rochas alcalinas tipicamente exibem altas concentrações dos álcalis Na e K em relação à sílica e/ou alumina, essa natureza insaturada manifesta sua mineralogia com a presença de feldspatóides e/ou piroxênios/anfibólios alcalinos. Tais rochas são encontradas quase que exclusivamente em configurações tectônicas estáveis e ocorrem de forma rara em regiões tectonicamente ativas de convergência de placas e zonas de subducção, assim como em zonas de *rift* oceânico, onde o gradiente geotérmico é alto (FIFTON & UPTON, 1987).

Inicialmente a geologia da região foi estudada a partir da delimitação de áreas com diferentes litologias e interpretação de suas relações, o que possibilitou abertura para novas pesquisas (ELLERT, 1959). Desta forma, trabalhos refinaram seus

levantamentos e possibilitaram hipóteses sobre o vulcanismo, geoquímica e petrologia da região.

O maciço é localizado entre os limites da Bacia Sedimentar do Paraná e da Serra da Mantiqueira; a presença de rochas sedimentares é verificada nas bordas oeste e sul, respectivamente nos municípios de Águas da Prata e Andradas, com sedimentos comparáveis às coberturas da Bacia do Paraná, como o arenito Botucatu e o folhelho Estrada Nova, ambos comumente recristalizados (ELLERT, 1959); o embasamento cristalino pré-cambriano permanece indiviso.

A distribuição litológica do maciço, elaborada através de datações geocronológicas, apresenta idades K-Ar que variam entre 87 Ma para a etapa inicial do domeamento e 53 Ma para as últimas manifestações como diques de fonólitos, ou seja, do Cretáceo Superior e ao Paleoceno (ULBRICH, 1994)

As associações petrográficas das rochas alcalinas do MAPC são um tanto complexas e ainda únicas no Brasil. Fonólitos ricos em potássio e nefelina-sienitos são os tipos predominantes de rochas, inclusive com ocorrências minoritárias de nefelina-sienitos portadores de eudialita. Há também ocorrências de rochas piroclásticas, subvulcânicas e intrusivas insaturadas (foiaítos, chibinitos, lujavritos).

As rochas não vulcanoclásticas da região estudada podem ser classificadas em três grupos, de acordo com suas características texturais e mineralógicas, estes grupos envolvem nefelina sienitos, fonólitos vulcânicos e subvulcânicos (tinguaítos), é válido ressaltar que as rochas foram consolidadas em diferentes ambientes magmático-estruturais (SCHORSCHER & SHEA, 1992):

Nefelina Sienitos: são rochas de granulometria média a grossa, isotropicamente estruturadas e com textura hipidiomórfica. Xenólitos são de representação local e fenocristais são praticamente ausentes.

Fonólitos: rochas de granulação muito fina, microporfírica (grãos com tamanho inferior a 0,5 mm), com ou sem evidências de fluxo magmático e/ou laminação e segregação, demonstram também a presença de xenólitos com bordas de reação inexpressivas;

Tinguaítos: rochas equigranulares, de granulação fina a média, porfíricas, com mesóstase aproximadamente 10 vezes maior que a dos

fonólitos; mostram variabilidade textural e mineralógica devido à avançada reação com abundantes microxenólitos, xenólitos e enclaves;

As rochas supracitadas são leucocráticas, com teor de minerais máficos geralmente inferiores a 35%, nenhuma demonstra disparidade com a classificação modal. São compostas predominantemente por feldspatóides, com destaque para os fonólitos portadores de leucita e pseudoleucita, por apresentarem mais que um feldspatóide. Lavas ankaratíticas (correspondentes extrusivos de olivina nefelinitos) também são encontradas em meio às litologias, porém sua classificação ainda não foi estabelecida.

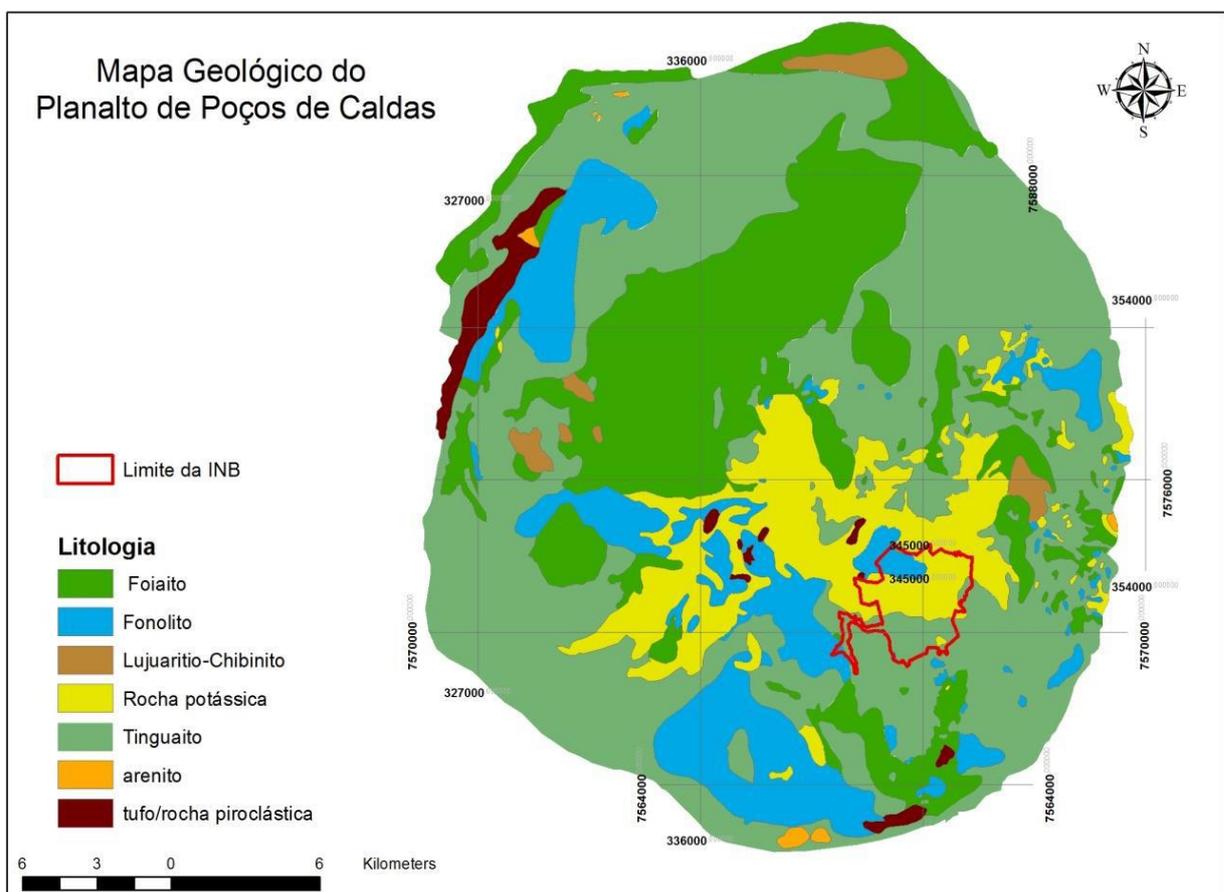


Figura 3: Mapa geológico regional do Mciço Alcalino de Poços de Caldas. Adaptado por ALBERTI (2017) de FRAENKEL et al (1985)

As rochas vulcanoclásticas pertencentes à sequência do MAPC, cuja ocorrência é marcante na porção oeste do complexo; representam tufo, brechas e aglomerados (ELLERT, 1959).

### 3.2.2 *Evolução metalogenética do Maciço*

A conformação das rochas alcalinas da região rendeu discussões a respeito da mineralogia e das mineralizações de elementos químicos estratégicos (SCHORSCHER & SHEA, 1992), para compreender a complexidade é preciso considerar a constituição geral do maciço e não apenas petrografias locais, uma vez que sua composição atual é resultante de processos intempéricos erosivos que envolve rochas extrusivas e intrusivas em escala regional, facilitadas e orientadas por estruturas geradas na subsidência crustal e na formação dos diques anelares marginais à caldeira (ELLERT, 1959).

A história evolutiva começa com um vulcanismo primitivo principal que envolve olivina nefelinitos, lavas fonolíticas e rochas vulcanoclásticas, seguidos pela subsidência da caldeira e a intrusão de nefelinas sienitos sob a forma de menores diques anelares e estruturas circulares. Ao fim do magmatismo, ocorreu a intrusão de nefelina sienitos portadores de eudialita  $[(Na,Ca,Fe)_6ZrSi_6O_{18}(Cl,OH)]$ , fato confirmado por estudos geocronológicos e estruturais (ELLERT, 1959).

O embasamento cristalino do MAPC, também denominado de Escudo Cristalino do Sul do Brasil possui arqueamento nas direções NW e NE (FREITAS, 1951), tais estruturas foram submetidas a tensões regionais que possibilitaram magmatismos durante o mesozoico e, assim, a formação do maciço.

Características estruturais são indicadoras do modo e intervalo de tempo de alojamento do corpo rochoso e seu subsequente resfriamento. Os dados indicam que as rochas sejam de origem cogenética com pequena diferenciação e fracionamento, o que produzira associações de rochas vulcânicas, subvulcânicas e plutônicas sem mudanças mineralógica e geoquímica significantes, o que também indicaria restrito intervalo de tempo para o magmatismo alcalino que produzira o MAPC (SHEA, 1992).

A alocação do complexo alcalino promoveu a concentração e incorporação de elementos incompatíveis (metassomatismo) pelo embasamento cristalino pré-cambriano da região, fato caracterizado pela adição de elementos químicos alcalinos às rochas (K e Na), o que é academicamente definido como fenitização, apresentado pela conversão da mineralogia primária da rocha, como por exemplo: transformação do quartzo em feldspatos alcalinos e substituição dos feldspatos iniciais por nefelina, algumas vezes as rochas podem apresentar núcleos de minerais primários.

Conhecidos depósitos minerais de origem supérgena estão contidos no MAPC, inclusas as mineralizações de bauxita, argilas, Zr, Zr-U-Mo, F, Th-ETRs-Fe. O grande interesse acadêmico nas características das rochas alcalinas frutificou extensa literatura sobre o complexo. Águas medicinais e radioativas são conhecidas nos municípios englobados e proximais ao MAPC, como em Águas da Prata, Poços de Caldas e Pocinhos do Rio Verde.

As rochas do MAPC apresentam teores de U, Th e elementos de terras raras (ETRs) típicos de suítes a nível mundial, com o exemplo das mineralizações em stockwork sobreposta ao minério disseminado em brechas vulcânicas e rochas fraturadas que compõem o produto que fora explotado da Mina Osamu Utsumi, e rendera U para a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e NUCLEBRAS (Urânio do Brasil) até meados de 1990.

No Morro do Ferro, constituído de *stockworks* de magnetita associados às rochas carbonáticas e atualmente situados em rocha alcalina extremamente alterada, é explorado Th e representa o maior depósito de baddeleyita ( $ZrO_2$ ). O depósito foi estudado como análogo natural para depósito de dejetos nucleares e suas rochas apresentam típicas variações texturais, porém são mineralógicas e geoquimicamente muito homogêneas (ULBRICH, 1984).

### 3.3 Geologia da mina Osamu Utsumi

A sequência de processos geológicos superimpostos responsável pela formação do complexo alcalino foi iniciada por magmatismo alcalino seguido de alterações hidrotermais e supérgenas, o que resultou na variedade mineralógica encontrada nas rochas mineralizadas da mina Osamu Utsumi (MOU) (WABER *et al.*, 1992). Desta forma, são encontrados minerais secundários e terciários distribuídos nas brechas vulcânicas e corpos tabulares com alterações hidrotermais potássicas e mineralizações de U – Th – Zr – ETR – Mo – F.

A extinção das atividades de uma câmara magmática varia, dentre outros fatores, de acordo com sua alimentação e sua profundidade de alocação. Através de datações Rb-Sr, o magmatismo alcalino, que configura os corpos rochosos hoje mineralizados na MOU, durou cerca de 10 M.a. (SHEA, 1992). Assim, neste período, o corpo cristalino ainda estava susceptível à esforços normais que estimularam a migração de

fluidos residuais para regiões adjacentes da câmara, durante o deslocamento o fluido estimulou reações metassomáticas localizadas e produziu os minerais secundários, baddeleyita e zircão, enriquecidos em urânio, tório, molibdênio e elementos terras raras (GARDA, 1990).

O soerguimento regional promoveu a exposição do maciço fraturado à superfície, interferiu diretamente no seu estado de equilíbrio físico-químico, o que alterou a mobilidade dos elementos componentes do corpo rochoso em questão. Os minerais terciários formados na MOU apresentam origem na exposição das rochas alcalinas intrusivas às condições atmosféricas, que altera o ambiente de redutor e neutro para oxidante e ácido. Desta forma, os elementos incompatíveis como U – Th – Zr – ETR – Mo e F, passam a ser lixiviados por fluidos meteóricos e migram para níveis mais profundos do perfil de alteração do solo, como é observado na Figura 4, este processo tem como produto depósitos de bauxita, gibbisita e caolinita, devido à laterização do solo e uraninita concentrada na zona de alteração com influência do nível freático (CAPOVILLA, 2001).

A atividade de extração mineral da MOU acentuou o processo erosivo das rochas que compõem a sua atual cava desativada, exposição destas rochas às condições atmosféricas induziram a um novo processo de remobilização dos elementos presentes nelas, de forma que é gerado o passivo ambiental denominado de Drenagem Ácida da Mina (DAM).



*Figura 4: Vista ampla da cava em descomissionamento onde foi possível observar o solo laterítico formado no perfil de alteração da rocha. Fonte: Autoria Própria*

## 4 PASSIVO AMBIENTAL SUBTERRÂNEO

### 4.1 Sistema Aquíferos Fraturados

Aquíferos são reservatórios de água caracterizados por apresentarem pacotes rochosos de alta porosidade e permeabilidade, contidos entre pacotes de rochas impermeáveis, nos quais acumulam água subterrânea em quantidade e vazão elevada, o que favorece a sua fluidez.

Um aquífero fraturado apresenta baixa porosidade primária, a existência de fluxo de água varia de acordo com a densidade, orientação, conectividade e abertura entre as fraturas existentes (DOMENICO & SCHWARTZ, 1990).

A porosidade que constitui um aquífero cristalino, composto por rochas ígneas e metamórficas, é denominada de secundária, uma vez que sua origem não é concomitante a gênese da rocha. Essa porosidade pode ocorrer na forma de descontinuidades ou manto de alteração, de forma a compor aquíferos fraturados e freáticos respectivamente.

As descontinuidades que compõem a porosidade secundária são estruturas formadas em resposta a esforços aplicados sobre a rocha que ultrapassam o limite de deformação elástica e, assim, sofrem deformações rúpteis permanentes, na forma de fraturas extensionais. A abertura destas fraturas pode ocorrer ao serem submetidas a um ou mais esforços de tração, tensão ou cisalhamento, de forma que gera três mecanismos de abertura (LAW & WILLSHAW, 1975): opening ou separação normal dos planos de ruptura sob a ação de esforço de tração; sliding ou deslizamento paralelo à superfície das fraturas e à frente de propagação da ruptura; tearing ou deslizamento paralelo à superfície das fraturas e perpendicular à frente de propagação da ruptura.

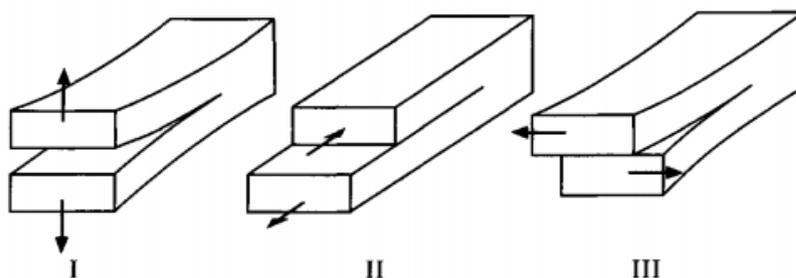


Figura 5: Modelos dos mecanismos de abertura: (I) Opening; (II) Sliding e (III) Tearing. Fonte: PASTORE & MIOTO, 2000.

O grau de fraturamento de uma rocha não é homogêneo nem isotrópico, assim como o comportamento de um maciço fraturado em relação a sua condutividade hidráulica (FIORI & WANDERESSEN, 2014), a redução da abertura de juntas e fraturas em profundidade acarretam no aumento da pressão litostática e no espaçamento entre as fraturas, e conseqüentemente ocorre a redução da porosidade.

A exposição de um maciço fraturado às condições atmosféricas equivale a aumentar a recarga hídrica que infiltra no meio através de sua porosidade. A interação do fluido que percola com o meio fraturado resulta no intemperismo químico da superfície de contato da rocha e no carreamento dos elementos químicos apresentam instabilidade às condições físico-químicas atuais.

A nova configuração do meio geológico que propicia mobilidade de elementos presentes, que por meio de fluxo hidrogeológico, direciona estes para áreas de estabilidade, de forma que pode ocorrer geração de Drenagem Ácida da Mina (DAM).

#### **4.2 Drenagem Ácida da Mina (DAM)**

A implantação de um empreendimento de grande porte no meio ambiente tem como premissa a análise de impacto ambiental que pode ser gerado, um dos focos na avaliação das possíveis alterações na natureza é o meio físico, que engloba avaliar em conjunto a interação entre o ar, a água e o substrato rochoso.

A análise histórica da interação destes três fatores permitiu o conhecimento do que é denominado de Drenagem Ácida da Mina (DAM), este fenômeno físico-químico ocorre a partir da exposição de rochas sulfetadas às condições atmosféricas, ou seja, susceptíveis a ação da água, do oxigênio e de agentes biológicos (FRANKLIN, 2007).

Em situações nas quais a rocha sulfetada está posicionada em subsuperfície e abaixo da ação intempérica, a geração de drenagem ácida é desprezível devido ao baixo Eh (SENGUPTA, 1993). Sua exposição às novas condições físico-químicas promove reações que visam reestabelecer um novo equilíbrio, desta forma, ocorre processo acelerado de oxidação do corpo rochoso que, ao interagir com a água superficial percolante (Figura 6), gera ácido sulfúrico, com alto poder de dissolução de metais (CARVALHO & FERREIRA, 2000).

Com a premissa de que depósitos minerais sulfetados são fontes potenciais de DAM, a assembleia de minerais que compõem o depósito pode influenciar diretamente na intensidade da geração de ácido (GRAY, 1996).

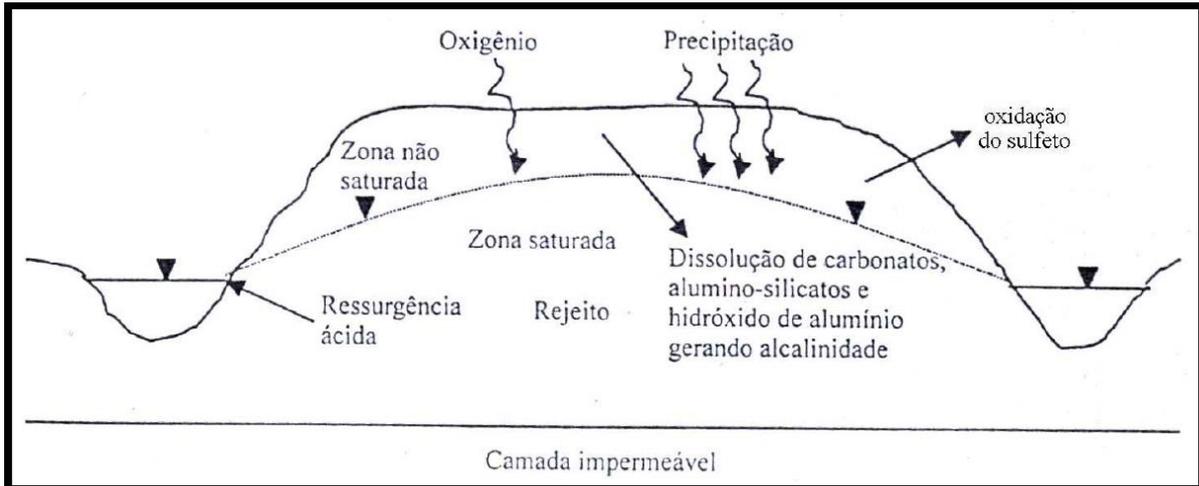
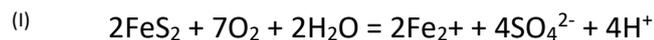


Figura 6: Processo de formação de drenagem ácida de mina em pilha de rejeito (Yanful e St-Arnaud, 1990, citado por Pastore e Mioto, 2000).

Dentre os minerais de influência na geração de DAM recebe destaque a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), devida sua alta frequência em depósitos de grande importância econômica como os de ouro, zinco, prata e urânio. A dissolução e mobilidade de seus elementos químicos é susceptível às variações em sua morfologia, tamanho das partículas e reatividade do meio (RODRIGUES, 2001).

A exposição de rochas à superfície promove a interação dos minerais presentes nela com as condições oxidantes da atmosfera, a equação I descreve a oxidação da pirita ( $\text{FeS}_2$ ) pelo oxigênio  $\text{O}_2$  do ar atmosférico (USEPA, 1994)



A geração de drenagem ácida ocorre em três estágios que envolvem a quebra da pirita na presença de água e oxigênio, os dois primeiros estágios são recorrentes em meio de pH neutro e com velocidades lentas e último em meio ácido que promove o estímulo de proliferação bacteriológica catalisadora. (PASTORE & MIOTO, 2000).

A alteração do meio em que elementos químicos como ferro, manganês, alumínio, urânio, enxofre e demais elementos estão presentes acarreta no comportamento diferente destes, a depender do Eh e pH, fato que varia suas respectivas solubilidades e mobilidades. Portanto, a exposição de rocha em uma lavra, que promove a elevação do Eh e o rebaixamento do pH, favorece a solubilidade deste metais pesados (CARVALHO & FERREIRA, 2000). A formação de hidróxido férrico, de coloração amarela, alaranjada ou vermelha, são indícios de DAM, uma vez que estes são

normalmente encontrados em corpos d'água próximos a este fenômeno (USEPA, 1994).

A Mina Osamu Utsumi é um modelo de geração de DAM em uma mineração que explora Óxido de Urânio (Uraninita –  $UO_2$ ) em rochas que apresentam sulfetos disseminados associados, de forma que apresenta alto potencial de interferência na natureza, e na qualidade de vida dos residentes do município de Poços de Caldas - MG localizado a jusante do Ribeirão das Antas e abastecido pelo mesmo, uma vez que ocorre mobilidade do urânio para este sistema de drenagem.

## 5 MÉTODOS E MATERIAIS

### 5.1 Análise Estrutural

A análise estrutural teve como objetivo interpretar a relação das intersecções geradas pelos planos de descontinuidades presentes no divisor de águas e assim compreender a direção preferencial de percolação de fluidos no meio. As descontinuidades analisadas são compostas por deformações rúpteis e compõem a porosidade secundária do corpo de estudo.

A análise geométrica é o tipo de análise estrutural que estuda as formas, orientações geográficas, tamanho e relações geométricas entre a estrutura principal e as estruturas de menor escala associada (FOSSEN, 2012). Com este princípio, estudos regionais por meio de fotointerpretação em aerofotografia permitem elaborar análises regionais, orientadas por padrões de lineamentos ressaltadas na forma de drenagens e cristas de morros, estas análises permitem uma previa orientação que prevalece sobre o fluxo hidrogeológico.

A análise geométrica das estruturas locais envolve a classificação e subdivisão das descontinuidades em famílias que apresentam orientação, abertura e espaçamentos similares, sua distribuição espacial no maciço influencia na densidade de estruturas que favorecem o fluxo de fluidos no meio, como ocorre na intersecção de dois ou mais planos de falhas e fraturas que conformam um eixo. O efeito de fluxo gerado através da porosidade secundária tem influência direta na condutividade hidráulica, que varia de acordo com o grau de abertura e as conectividades entre as descontinuidades (FIORI & WANDERESSEN, 2014).

A formação de eixos viabiliza a percolação do fluxo hidrogeológico (Figura 7), o que favorece sua interação com a rocha e, portanto, sua erosão. A mobilidade dos elementos químicos também é intensificada nestas regiões, pois nelas ocorrem constantes alterações físico-químicas. Desta forma a coleta de dados para análise estrutural com o foco na dinâmica hidrogeológica de um maciço rochoso deve ser orientada pela coleta das medidas dos eixos de intersecções formados a partir do encontro de falhas de fraturas.

A representação estereográfica é um método rápido e eficiente para representar e auxiliar na interpretação dos dados de atitudes coletados em campo (FOSSEN, 2012), portanto para conclusão da análise geométrica, deve ser feita a análise em escritório

dos dados, através da análise estereográfica, que subdivide as estruturas em domínios homogêneos. A integração destes dados permite uma visão das orientações dominante das estruturas estudadas.

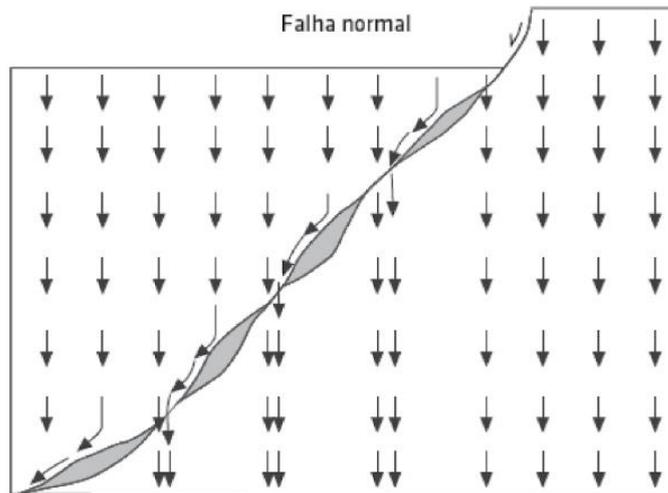


Figura 7: Modelo de fluxo hidráulico em uma falha normal com formação de zonas impermeáveis de brecha no plano de cisalhamento. O fluxo segue na direção de fraturas e microfraturas subverticais, Fonte: FIORI & WANDERESEN, 2014.

## 5.2 Métodos Geofísicos

Os métodos geofísicos escolhidos foram os da Eletrorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP) cuja aquisição deu a partir da técnica de tomografia elétrica (ETR) em arranjo Schlumberger.

### 5.2.1 Método da Eletrorresistividade (ER)

O método da Eletrorresistividade aplicado ao reconhecimento da subsuperfície é baseado na resistência dos diferentes tipos de materiais geológicos apresentam ao serem submetidos à passagem de corrente elétrica (REYNOLDS, 2011).

A aplicação deste método consiste na locação de dois eletrodos de corrente, denominados A e B, responsáveis por injetar corrente elétrica artificial no solo, desta forma, é gerada uma área de influência do campo elétrico. A locação de outros dois eletrodos, potenciais M e N, dentro desta área permite a leitura da diferença de potencial resultante entre eles. A Figura 8 representa a configuração dos eletrodos.

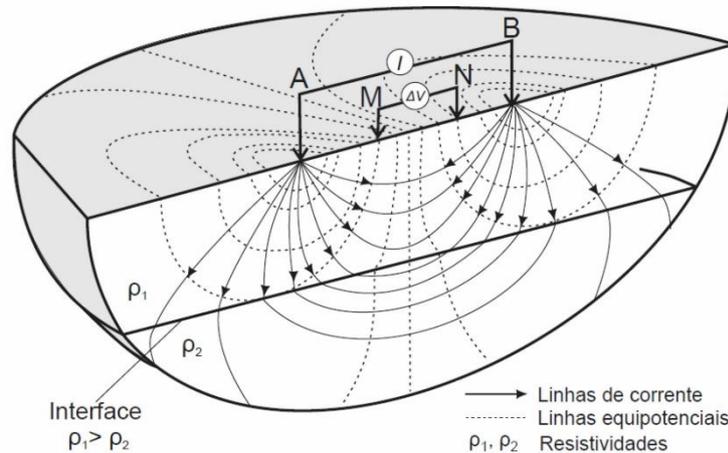


Figura 8: Arranjo Schlumberger para medidas de resistividade. Fonte: Knödel et al., 2007.

A heterogeneidade presente no meio geológico é expressa por meio da resistividade medida, a qual varia de acordo com a composição mineralógica e a quantidade de água nas fraturas do maciço. Desta forma, é possível interpretar regiões com resistividade reduzida como as zonas de maior percolação de água (REYNOLDS, 2011).

O meio geológico apresenta heterogeneidade, fatores como porosidade, composição mineralógica, saturação e composição de fluidos presente no meio são influentes nos valores que computam a resistividade medida no maciço (REYNOLDS, 2011), desta forma, o valor encontrado é a Resistividade Aparente ( $\rho_a$ ).

$$\rho_a = \frac{V}{I} \cdot K \quad (\Omega\text{m})$$

Onde:

$\rho_a$ : Resistividade aparente - [ $\Omega\cdot\text{m}$ ];

V: Campo potencial - [mV];

I: Campo elétrico - [mA];

K: Fator geométrico - [m].

A resolução e profundidade da aquisição de dados é condicionada ao espaçamento entre os eletrodos, quanto mais afastados maior será o alcance vertical, no entanto, menor a resolução (REYNOLDS, 2011).

### 5.2.2 Método da Polarização Induzida (IP)

Minerais e rochas apresentam comportamentos específicos de acordo com sua composição elementar e sua interação com meio geológico. O trânsito de campo elétrico induz a formação de campo potencial, onde há rochas susceptíveis a ele ocorre a orientação dos elementos químicos de acordo com o campo gerado, assim é definido o conceito de cargabilidade. O tempo de decaimento dessa tensão residual permite diferenciar a presença de elementos metálicos e fluidos. Desta forma, o método de Polarização Induzida (IP) é definido como fenômeno de geração de campo potencial induzido pelo fluxo de corrente elétrica em subsolo, observado após o corte do campo artificial (SUMNER, 1978).

Existem dois mecanismos de Polarização Induzida (Figura 9): A polarização de eletrodos e a polarização de membranas, ambos são aplicados ao estudo do caso em questão devido a heterogeneidade do meio geológico (REYNOLDS, 2011). A Polarização Induzida de eletrodo ocorre em meios sólidos que apresentam mobilidade iônica e eletrônica, como os minerais metálicos; já a polarização de membrana, ocorre em meios fluidos que permitem a mobilidade de íons (EVERETT, 2013). A principal aplicação atual do método de Polarização Induzida é a prospecção de minerais

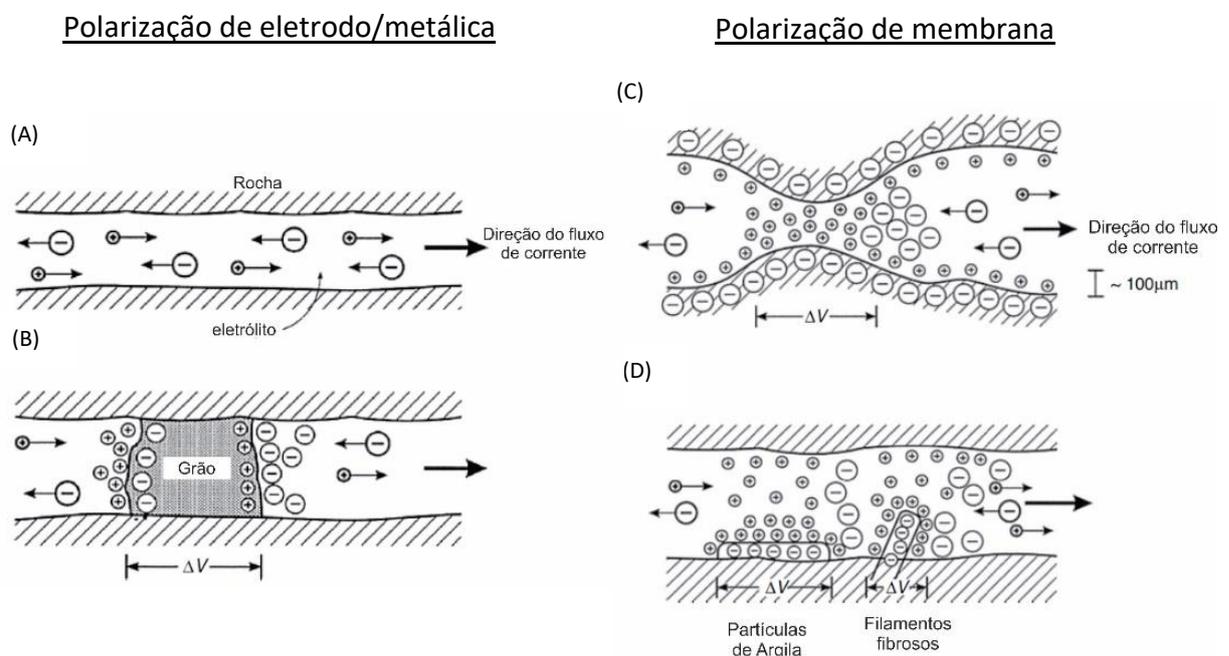


Figura 9: Polarização de eletrodo/metálica à esquerda e polarização de membrana na direita. (A) Fluxo eletrolítico livre em um canal aberto; (B) Polarização de um grão eletronicamente condutor, que bloqueia um canal; (C) uma constricção dentro de um canal entre grãos minerais; e (D) partículas de argila negativamente carregadas (FRASER ET AL., 1964) e elementos fibrosos ao longo dos lados de um canal.

metálicos disseminados e, em extensão, exploração de águas e geotérmicas (REYNOLDS, 2011).

A aquisição de dados da Polarização Induzida ocorre a partir dos mesmos eletrodos utilizados para a Eletrorresistividade, no entanto, a medição da tensão residual é feita somente após o corte de fornecimento de campo elétrico para o solo, desta forma, os dados medidos representarão o retorno ao estado original através de um decaimento transiente da variação de potencial (TELFORD *et al.*, 1990).

A cargabilidade é a capacidade que um dado corpo apresenta de armazenar energia através da orientação induzida de seus componentes de carga. Este parâmetro pode ser mensurado através do método da Polarização Induzida ao calcular seu decaimento em função do tempo ou em função da frequência (TELFORD *et al.*, 1990). No presente trabalho, devido ao equipamento utilizado, parâmetro físico medido é a cargabilidade é mensurado em mV/V.

O decaimento do potencial é medido por meio da cargabilidade pela seguinte equação:

$$M = \frac{1}{V_c} \cdot \int_{t_1}^{t_2} V_t(t) dt$$

Onde:

$M$ : Cargabilidade - [mV];

$V_c$ : Potencial Primário;

$V_T$ : Potência transiente;

$t_1$ : Tempo Inicial - [mS];

$t_2$ : Tempo Final

$A$ : Área da seção

No contexto geológico da área de estudos, a corrente inserida no corpo rochoso é conduzida através da mobilidade de íons dispostos na água/fluido subterrâneo intrínsecos às porosidades primárias e secundárias do meio (EVERETT, 2013). Desta forma, a cargabilidade do maciço em estudo está relacionada às regiões que apresentam mineralizações sulfetadas, compostas por grãos eletricamente

condutores susceptíveis à polarização metálica induzida a partir da carga elétrica injetada no solo.

### 5.2.3 Técnicas e Arranjos

#### 5.2.3.1 Tomografia de Resistividade Elétrica (ETR)

A Tomografia de Resistividade Elétrica é uma técnica que utiliza de interfaces horizontais para medir a variação lateral e mensurar as propriedades da rocha em sub-superfície usado (KEAREY *et al.*, 2002).

Esta técnica utiliza os mesmos eletrodos A, B, M e N, de forma a mantê-los com separação constante e simétrica ao longo da linha que deseja adquirir as características do subsolo (KEAREY *et al.*, 2002), desta forma, é possível gerar um perfil com seções horizontais. Autores como Moura & Malagutti Filho (2003) e Santos (2005) aplicaram e detalharam esta técnica.

#### 5.2.3.2 Arranjo Schlumberger

O arranjo dos eletrodos durante a aquisição dos dados pode variar de acordo com a configuração definida, dentre eles recebem destaque os arranjos Dipolo-dipolo, Werner e Schlumberger, este último, utilizado no presente trabalho, (Figura 10) recebeu o nome em homenagem ao pesquisador e criador do arranjo, Conrad Schlumberger, pertencente à escola francesa.

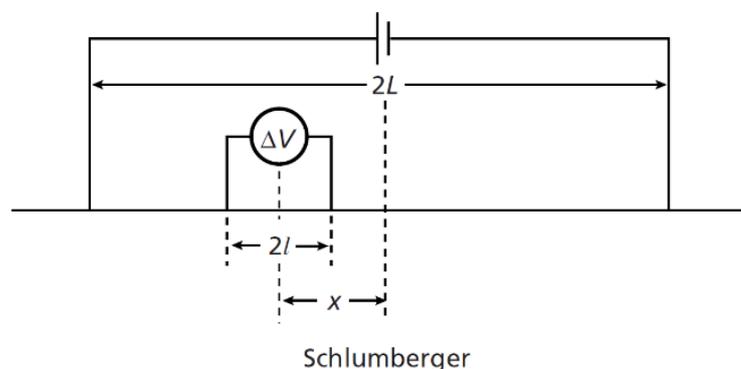


Figura 10: Configuração dos eletrodos para aplicação do arranjo Schumberger. Fonte: KEAREY *et al.*, 2002.

No arranjo Schlumberger, é definido o espaçamento  $2L$  entre os eletrodos injetores de corrente, M e N, onde ocorrem variações laterais e o espaçamento  $2l$  entre os eletrodos de corrente, A e B, fixo e imóvel. Para valores muito elevados de  $L$ ,

também é necessário elevar o valor de  $l$  e calcular o valor da resistividade aparente a partir da seguinte equação (KEAREY *et al.*, 2002):

$$\rho_a = \frac{\pi (L^2 - x^2)^2 \Delta V}{2l (L^2 + x^2) I}$$

Em situações em que a locação dos eletrodos potenciais é disposta no centro dos eletrodos de corrente,  $X = 0$ , logo:

$$\rho_a = \frac{\pi L^2 \Delta V}{2l I}$$

A aplicação deste arranjo é considerada prática em comparação dos arranjos Dipolo-Dipolo e Werner uma vez que este necessita da movimentação de apenas dois dos quatro eletrodos, e conseqüentemente sua aquisição de torna mais rápida (MUSSETT & KHAN, 2000).

### 5.3 Aplicações da Prospecção Geofísica associada a Análise Estrutural

O uso de métodos geofísicos na prospecção mineral apresenta vantagens quanto a relação custo benefício, uma vez que estes permitem fácil logística e rápida aquisição de dados. Além de delimitar zonas mineralizadas, esses métodos permitem também modelagem e interpretação fluxos hidrogeológicos subterrâneos de fluidos que apresentam contrastes com o meio que percolam.

No trabalho de Agnoletto & Leite, (2015) foram utilizados métodos de Eletorresistividade e Polarização Induzida para a identificação de corpos filoneanos na área de mineralizações auríferas de Flor da Serra - MT, inserida na porção leste da província Aurífera de Alta Floresta (PAAF). O autor utilizou ainda testemunhos de sondagens para elaborar a análise estrutural com foco na definição de lineamentos, intensificados nas zonas de cisalhamento, passíveis de preenchimento pegmatíticos. O estudo ocorreu em busca de contrastes anômalos entre encaixante granodiorítica e um *stock* granítico com disseminação sulfetos e silificação moderada nas zonas cisalhadas. A interpretação integrada de dados geoeletricos, magnéticos e estruturais permitiu a definição de alvos com ouro filoneano e ouro disseminado para passíveis de exploração.

A técnica do imageamento elétrico bidimensional empregada pelos métodos da Eletorresistividade e Polarização Induzida associados foi realizada por Lima, (2010),

que visou identificar zonas de alteração e extensão lateral e profundidades de faixas fraturadas que compõem o Sistema Aquífero Cristalino da Bacia do Alto Rio Curaçá, localizado no semiárido baiano. A execução de sondagens que interceptam os lineamentos estruturais da área e realização de perfis estratigráficos auxiliaram no mapeamento da geometria estrutural dos aquíferos. Os dados adquiridos pelo autor foram processados utilizando o programa RES2DINV, e obtido como produto do levantamento geofísico perfis invertidos das resistividades de até 76,5 m de profundidade. A integração dos métodos permitiu a correlação entre estrutura geológica e a presença de u aquífero livre e raso.

Autores como Moura, (2003) e Moreira & Braga (2008), utilizam do método de IP para a delimitação e análises de áreas contaminadas. Elis *et al.*, (2004) e Braga, (2008) utilizaram do método de eletrorresistividade para caracterização de aquíferos e autores como Fruchting, (2009), e Nunes (2007) utilizam métodos de IP e RE na prospecção mineral de cobre e zinco, e aurífera respectivamente.

#### **5.4 Aquisição e Processamento de dados**

A área de estudo compreende à frente de lavra NE da mina desativada Osamu Utsumi, essa estrutura apresenta aproximadamente 550 m de extensão, 160 m de largura e 70 m de altura e apresenta comportamento de um divisor de águas entre o córrego da consulta e o córrego do cercado, ambos afluentes do Rio verde e Ribeirão das Antas, respectivamente.

Devido às áreas e estruturas exposta do maciço, a aplicação de análise estrutura associada ao método geofísico ETR foi considerada como forma ideal para obter a relação entre as estruturas estudadas na frente de lavra e o fluxo da água subterrânea que percola no maciço rochoso.

A aquisição de dados ocorreu em duas etapas diferentes, primeiramente foi executada a coleta de medidas estruturais e, posteriormente, foi realizado o levantamento de dados geofísicos da frente de lavra.

##### *5.4.1 Levantamento dos dados estruturais*

O levantamento de dados estruturais teve início na análise em escala regional do Maciço Alcalino de Poços de Caldas através de imagens aéreas obtidas no Google Earth Pro, estas imagens foram georreferenciadas e trabalhadas no *software* ArcGis 10.3. com a finalidade de auxiliar na compreensão da orientação predominante em

escala regional de falhamento e seu reflexo nas discontinuidades presentes na frente de lavra da Mina Osamu Utsumi.

Em seguida, ocorreu o levantamento de dados em campo, onde foi utilizada bússola Brunton com declinação magnética de  $21^{\circ}37'$  para a tomada das 150 medidas estruturais na notação Clar, adquiridas nos planos de falhas e fraturas presentes na frente de lavra NE. A seleção dos pontos de medidas nos planos de fraturas considerou a presença de fluxo d'água ou indícios de fluxo na forma de alterações esbranquiçadas, assim, foi possível definir as famílias que influenciam no fluxo hidrogeológico entre a cava e o maciço.

Os dados estruturais coletados foram organizados em arquivo .txt e processados no *software* Openstereo, a fim de elaborar tratamento estatístico na forma de estereogramas e assim auxiliar na interpretação dos dados.

#### 5.4.2 Aquisição de dados geofísicos

Para o levantamento geofísico, 3 linhas de aquisição foram distribuídas uniformemente na superfície do maciço (Figura 11), de forma a encobrir toda a área do divisor de águas. A linha 1 e a linha 2 foram posicionadas próxima à borda do talude e sob o maciço, a linha 3 sobrepôs à área de transição entre o maciço e o bota-fora (BF- 4). Cada linha possuiu 400 m de extensão com espaçamento de 10 m entre

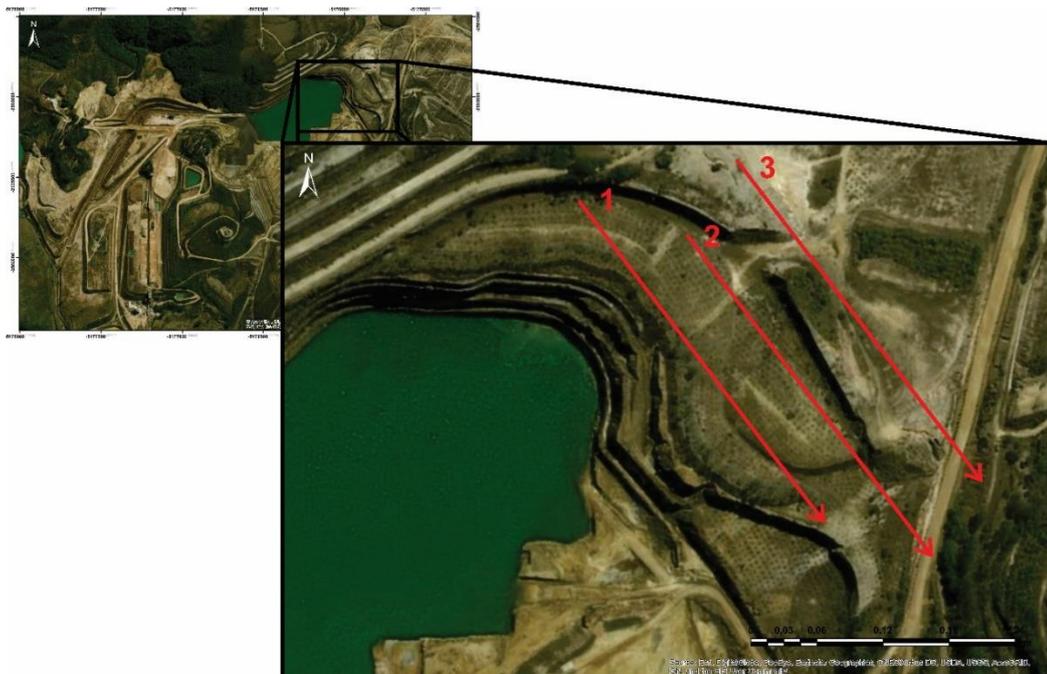


Figura 11: Disposição das três linhas de aquisição dos dados de resistividade e da cargabilidade no corpo de estudo. Imagem de satélite extraída do programa Google Earth em abril de 2018.

os eletrodos de cerâmica preenchidos com solução de sulfato de cobre ( $\text{Cu SO}_4$ ) (Figura 12a).

A técnica Tomografia Elétrica de Resistividade foi aplicada através dos métodos da Eletroresistividade e da Polarização Induzida com arranjo Schlumberger, desta forma, foi possível adquirir seus respectivos parâmetros físicos, a ser resistividade e cargabilidade. Através dos parâmetros obtidos foi possível elaborar seções e modelos tridimensionais.

O equipamento utilizado na aquisição (Figura 12a) foi um resistímetro da marca Terrameter LS (ABEM – Suécia) cedido pelo Departamento de Geologia Aplicada (DGA) da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Este equipamento realiza os ensaios a partir da inserção de corrente alternada de baixa frequência no meio de forma cíclica e realiza a sua leitura de acordo com o parâmetro analisado. A aplicação permite a filtragem dos dados coletados e que estes sejam apresentados com o cálculo do desvio padrão do conjunto de medidas (ABEM, 2006)

A partir da interpretação dos dados foram feitas correlações com características geológicas e hidrogeológicas, que estão relacionadas direta ou indiretamente a litologia e fluxo hidrogeológico presente maciço (MOON *et al.*, 2006).

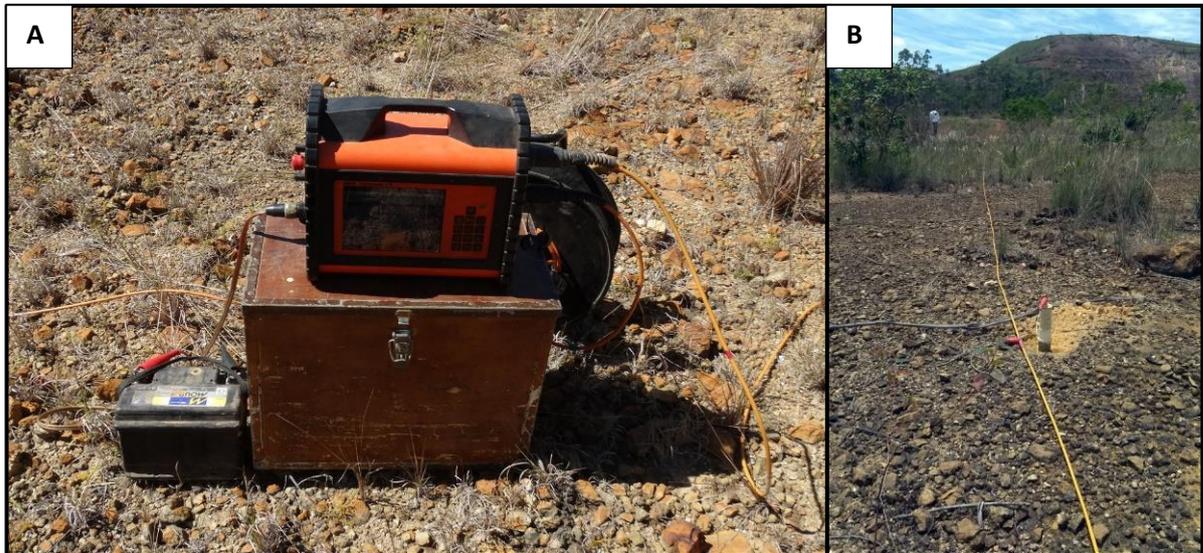


Figura 12: (A) Resistímetro da marca Terrameter LS (ABEM – Suécia), equipamento utilizado na captação de dados de dados geofísicos. (B) Linha de aquisição de dados realizada na superfície do divisor de águas que compões a frente de lavra NE da MOU.

Os dados foram processados por meio do *software* Res2Dinv, versão 3.53, afim de gerar o modelo de inversão com imagens espaciais e representativas da

resistividade e cargabilidade presentes no maciço (GRIFFITHS & BARKER, 1993). Os dados utilizados para a geração dos perfis 2D foram inseridos na forma de tabela em três arquivos individuais, cada uma representativa de uma seção.

O modelo de inversão consiste na representação dos dados coletados em campo na forma de bloco-diagramas superpostos de acordo com os dados coletados em campo (EDWARDS, 1977) a fim de reduzir o contraste entre as resistividades: aparente, a calculada e a medida em campo. Como produto, são elaboradas seções com escala gráfica convertida em razão logarítmica e intervalos de interpolação de valores em cores (MOREIRA *et al.*, 2016).

Para elaboração de blocos-diagramas 3D foi utilizado o *software* Oasis Montaj Geosoft, o qual interpolou os modelos 2D a partir da nova tabela de dados inserida, para isto, os dados foram rearranjados em uma tabela única com as variáveis “x”, “y” e “z”, com dados representativos do espaçamento entre as linhas, profundidade modelada pela inversão e valor da resistividade/cargabilidade, respectivamente.

## 6 RESULTADOS

A frente de lavra NE da mina Osamu Utsumi (Figura 13) é composta por rochas de coloração cinza claro com alterações esbranquiçadas, sua composição é essencialmente de nefelina-sienitos e fonólitos. O corpo rochoso apresenta 70 m de altura aproximadamente, e foi subdividida em 5 bancadas acima do nível d'água com 12 m de altura e 7 m de largura. O talude com face voltada para SW apresenta ângulo de 70 ° de inclinação. No topo das bancadas é observado registros das ações intempéricas sobre os fonólitos, na forma de fina camada de solo bege e milimétricas camadas de óxidos de Fe e Mn.

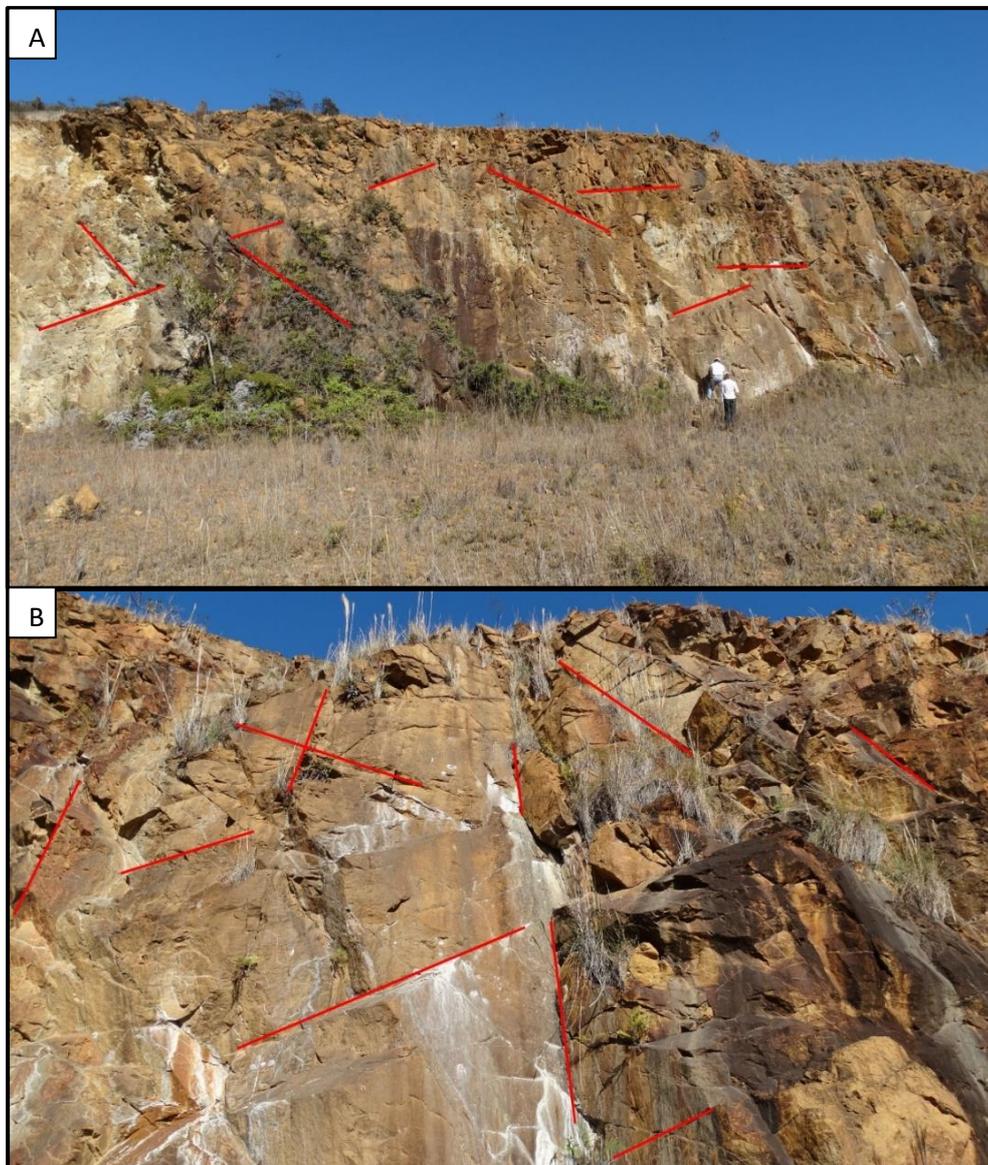


Figura 13: (A) Levantamento de dados estruturas em campo, realizado na frente de lavra NE da MOU. (B) Em vermelho estão destacadas a famílias de fraturas das quais foram coletadas as orientações e mergulhos. É possível observar o registro da alteração causada nas áreas de maior escoamento do fluxo hídrico, próximo aos eixos formados a partir da intersecção de dois planos de fraturas.

Destaca a presença de três famílias de fraturas, as quais foram objeto de estudo por meio de medição na anotação Clar do rumo e ângulo de mergulho. Associada ao lineamento de intersecção de alguns destes planos foram identificados fluxos d'água contínuo, tais estruturas apresentam maior concentração na lateral noroeste do maciço e atuam como porosidade secundária que facilita o fluxo d'água entre o maciço e a cava.

O levantamento estrutural da frente de lavra NE indicou orientação preferencial das fraturas para N-S e mergulho para W e NW, com predominância dos ângulos de mergulho entre  $40^\circ$  e  $55^\circ$ , como é possível observar no estereograma (Figura 14) elaborado a partir das coletadas em campo.

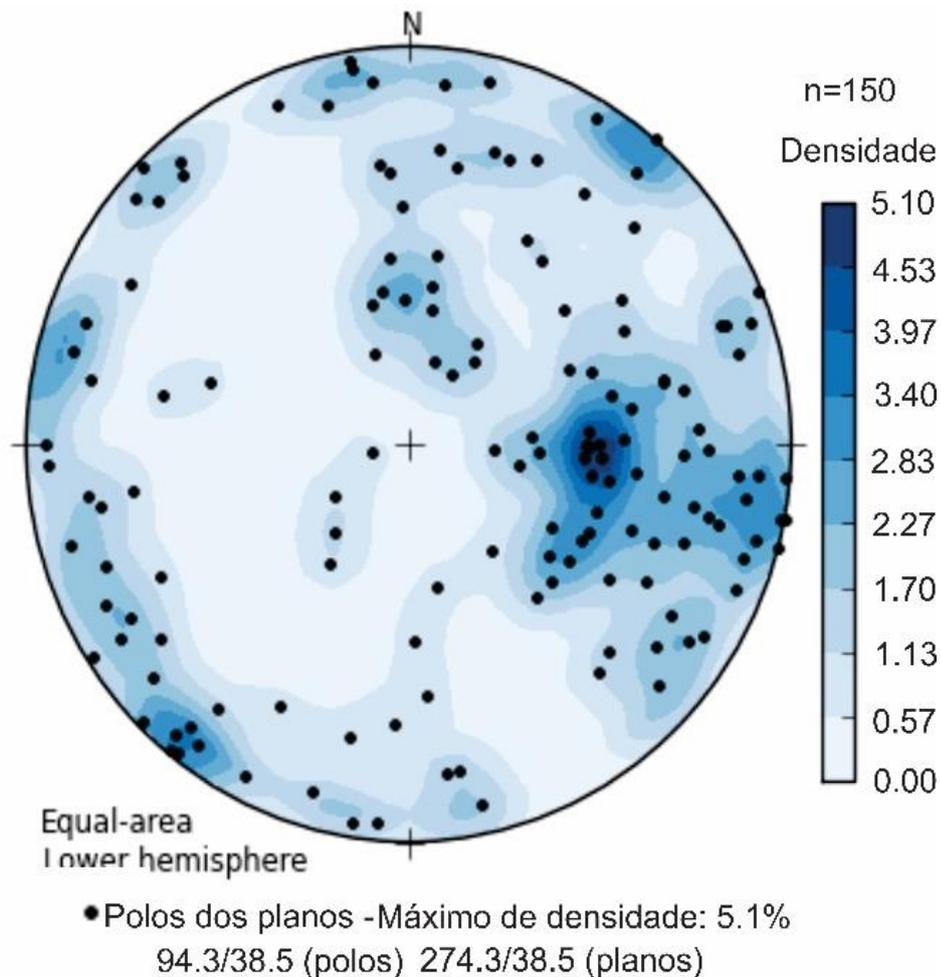


Figura 14: Estereograma com os 150 polos das medidas coletadas em campo, que indica a orientação preferencial das fraturas para N-S e apresenta concentração de polos em torno de  $55^\circ$ . Elaborados no software Open Stereo.

Os resultados das aquisições geofísica foram discutidos com auxílio dos perfis de resistividade e de cargabilidade elaborados a partir dos dados coletados em campo. A análise conjunta destes parâmetros tem como objetivo identificar zonas saturadas associados a zonas sulfetadas e sua conseqüente geração de DAM.

Com orientação NW-SE paralela à frente de lavra estudada, cada um dos perfis representa o caminhamento no qual foram adquiridos os dados, portanto possuem 400 m de comprimento e podem alcançar até 70 m de profundidade após o processamento. As imagens 15, 16 e 17 ordenam os perfis de forma que os dados de resistividade são apresentados na porção superior e os dados de cargabilidade na porção inferior.

Suas escalas gráficas apresentam variação logarítmica e os tons frios representam valores menores e tons quentes representam valores maiores. Para os parâmetros avaliados os intervalos de alta cargabilidade com valores superiores a 6 mV/V são condizentes às zonas sulfetadas, assim como os intervalos de baixa resistividade que apresentam valores inferiores a 37  $\Omega.m$  são correspondentes a zonas saturadas pelo fluxo hidrogeológico, conforme tabela abaixo:

*Tabela 1: Relação entre os valores de resistividade e de cargabilidade e suas interpretações*

<b>Relação Cargabilidade X Resistividade</b>			
↑	Cargabilidade (M > 6 Mv/V)	↑	Resistividade ( $P_a > 81581 \Omega.M$ ) → Zona sulfetada
↓	Cargabilidade (M < 1,2 Mv/V)	↓	Resistividade ( $126 < P_a < 37 \Omega.M$ ) → Zona saturada
↑	Cargabilidade (M > 6 Mv/V)	↓	Resistividade ( $P_a < 126 \Omega.M$ ) → Geração de DAM
↓	Cargabilidade (M < 1,2 Mv/V)	↑	Resistividade ( $P_a > 15548 \Omega.M$ ) → Zona silicificada

Foram destacadas as zonas de baixa resistividade, linha tracejada em preto, e as zonas de alta cargabilidade, em cinza. Estes destaques estão representados em ambos os perfis, afim de promover uma comparação entre os parâmetros.

A linha 1 apresenta os dados mais próximos da frente de lavra. Nela foram encontradas duas zonas de destaque para os parâmetros analisados (Figura 15).

A primeira, inicia a noroeste, junto ao início do caminhamento e permanece até 80 m. Os valores de resistividade inferiores a 126  $\Omega.m$  sugerem presença de fluxo hidrogeológico oriunda do talude que circunda o maciço estudado. Na comparação entre os parâmetros é possível interpretar que a zona saturada tem área de influência

sobre rochas mineralizadas e solubiliza os sulfetos uma vez que a cargabilidade é superior a 6 mV/V, portanto, esta é uma região de origem da DAM.

A segunda região analisada está destacada a sudeste do perfil, na análise comparativa é possível observar valores de baixa resistividade na profundidade entre 1370m e 1330m concomitantes a altos valores de alta cargabilidade. Seus valores são similares aos analisados anteriormente, no entanto o fluxo hidrogeológico abastecido por precipitação pluviométrica e está restrito à região superficial do maciço, sem variação vertical ou conexão a profundidade.

Ainda na linha 1 foram identificadas duas pequenas áreas de alta resistividade entre 150m e 220m do caminhamento do perfil, tais zonas são correlacionadas às zonas silicificadas e presença de veios de quartzo gerados durante a evolução geotectônica do maciço ou a problemas de leitura dos eletrodos devido ao solo seco.

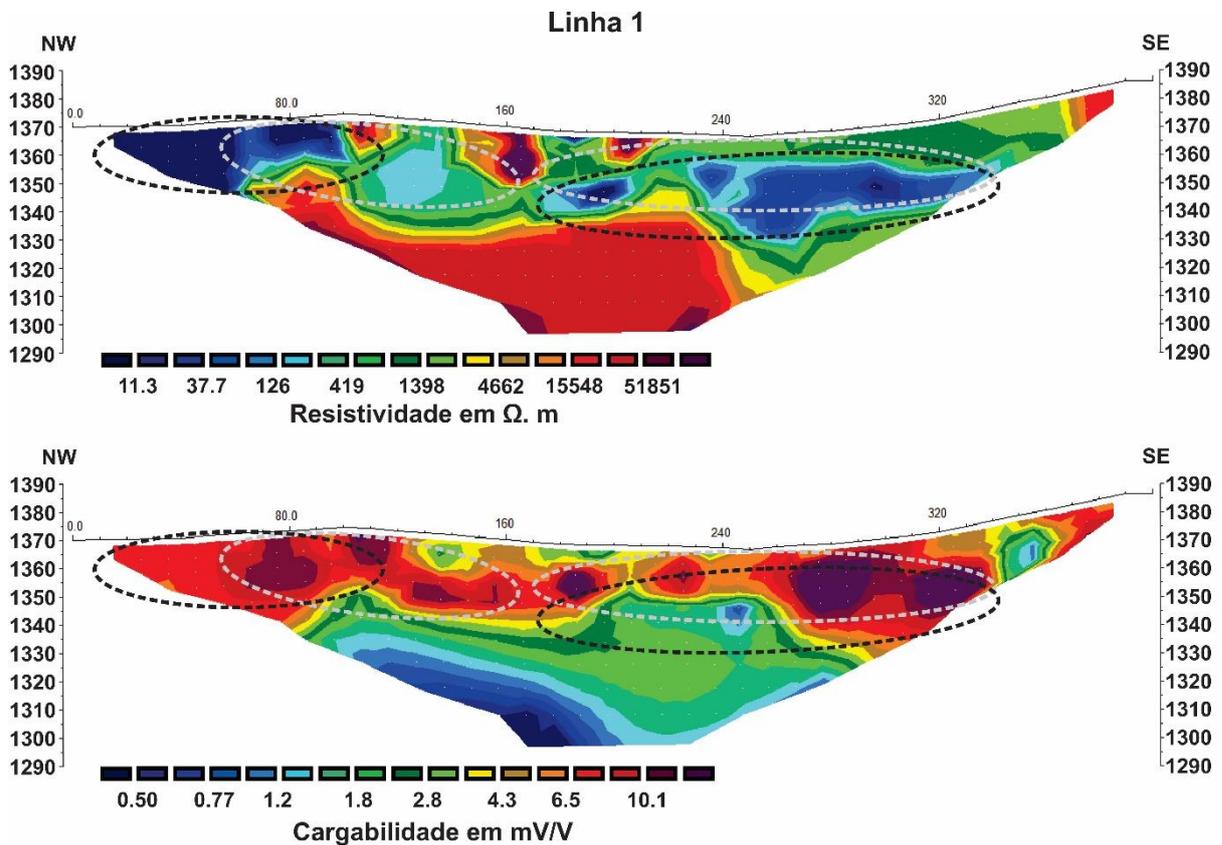


Figura 15: Perfis elaborados no software RES2DINV referentes à linha 1, resultante da aquisição de dados de resistividade e cargabilidade, respectivamente. Em preto está destacada a zona de baixa resistividade (inferiores a 126  $\Omega \cdot m$ ) e em cinza as zonas de alta cargabilidade (superiores a 6,5 mV/V). Nele é possível observar que os parâmetros analisados apresentam anomalias na mesma posição.

As mesmas relações foram estudadas nos perfis gerados a partir dos dados da linha 2 (Figura 16), neles é possível observar que o volume de zonas de baixa

resistividade reduz expressivamente, no entanto sem que sejam extintas, de forma a manter a conectividade do fluxo entre as linhas. As regiões próximas a 160m e 310m apresentam contexto de geração de DAM aos estudado na linha 1, no entanto com leve deslocamento do fluxo para profundidade.

A sudeste do perfil de resistividade destaca uma zona de baixa resistividade concomitante à uma zona de ponderada cargabilidade, após os 320m de caminhamento, o que auxilia na compreensão de que o fluxo está diretamente relacionado às estruturas nelas presentes.

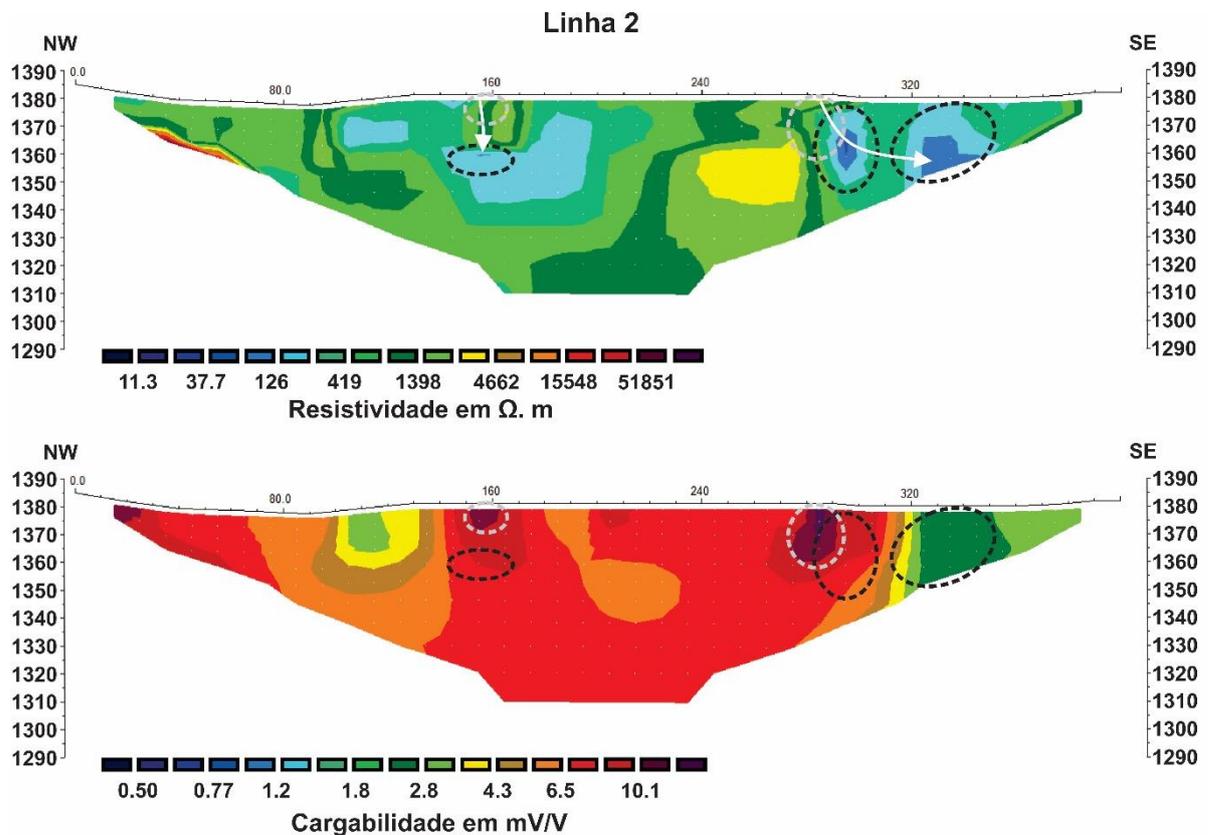


Figura 16: Perfis elaborados no software RES2DINV referentes à linha 2, resultante da aquisição de dados de resistividade e cargabilidade, respectivamente. Em preto está destacada a zona de baixa resistividade (inferiores a 126  $\Omega$ .m) e em cinza as zonas de alta cargabilidade (superiores a 6,5 mV/V). A sudeste é possível observar a geração de DAM com fluxo descendente.

Na linha 3 também foi averiguada a presença de baixa resistividade a sudeste (figura 17), o que corrobora para a presença da comunicação do fluxo subterrâneo entre as linhas. Esta zona de baixa resistividade entre 240 m e 300 m apresenta valores inferiores a 37,7  $\Omega$ .m, de forma que são mais representativos do fluxo hidrogeológico contaminado por DAM quando comparados aos dados extraídos da linha 2.

Nesta linha ocorre uma sequência de três relações entre os parâmetros estudados que demonstram a formação de drenagem ácida da mina, foram destacadas no perfil as relações a serem analisadas. A primeira e mais superficial apresenta resistividade inferior a 419  $\Omega.m$  e cargabilidade entre 6 mv/v 10 mv/v, é representativa de um meio no qual há percolação de água superficial sem interação com rocha mineralizada.

Ao lado desta foi destacado em cinza a região de alta resistividade e cargabilidade típicos de uma zona sulfetada, com valores superiores a 51851  $\Omega.m$  e 10 mv/v respectivamente. Em profundidade foi destacada a região que apresenta o menor valor de resistividade, inferior a 37  $\Omega.m$  e moderada a baixa cargabilidade, próxima a 6 mv/v, representativo de zona não mineralizada com fluxo de DAM.

Esta sequência de combinação de parâmetros compreende a formação de DAM oriunda da migração do fluxo hidrogeológico, abastecido superficialmente e que migra pelos vazios pré-existentes formados no BF – 4 e interage com as rochas sulfetadas, por fim flui para regiões mais profundas devido o gradiente gravitacional e a existência de conectividade entre as fraturas secundárias.

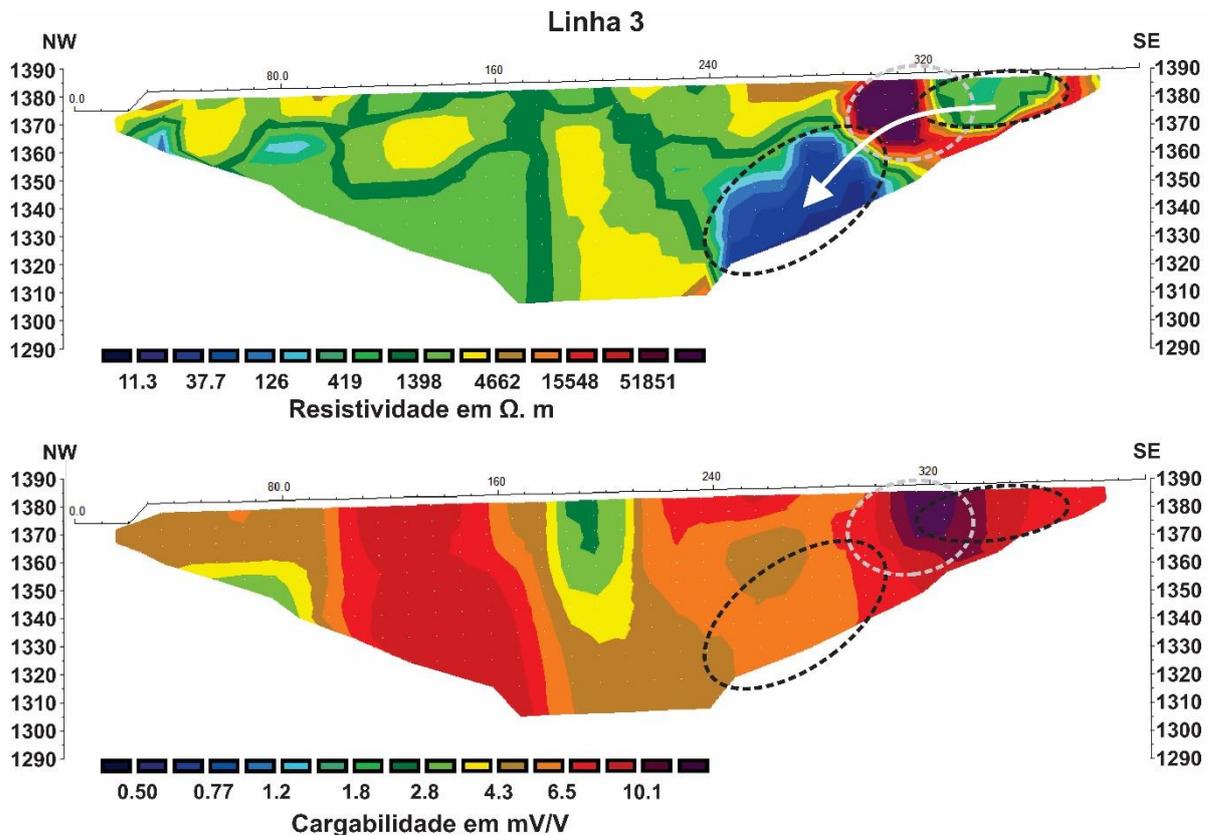


Figura 97: Perfis elaborados no software RES2DINV referentes à linha 3, resultante da aquisição de dados de resistividade e cargabilidade, respectivamente. Em preto está destacada a zona de baixa resistividade (inferiores a 126  $\Omega.m$ ) e em cinza as zonas de alta cargabilidade (superiores a 6,5 mV/V). A sudeste é observado a região de maior deslocamento da DAM gerada, com abastecimento superficial e fluxo gravitacional orientado pela conexão entre as fraturas.

Com o intuito de facilitar a visualização do fluxo subterrâneo e as rochas sulfetadas, os perfis de resistividade e cargabilidade foram ordenados e analisados (Figura 18a e 18b). Estes perfis, gerados pelo Res2div, quando georreferenciados permitem a interpolação de seus dados, pelo método de Krigagem, que quando inseridos na plataforma Oasis Montaj Geosoft é gerado um modelo de visualização 3D dos parâmetros analisados, como observado na Figura 18.

Para a análise comparativa, as zonas de resistividade inferior a  $126 \Omega.m$  também foram destacadas e rebatidas no bloco de cargabilidade. Desta forma é possível notar a simultaneidade entre as propriedades e, portanto, a relação direta do fluxo hidrogeológico na rocha.

Os modelos tridimensionais estão dispostos de forma que a visualização coincide com a vista do maciço quando observado da cava. Eles foram elaborados de forma a expor a variação vertical e horizontal geométrica das anomalias encontradas.

Estes produtos gráficos apresentam três relações entre os parâmetros que foram analisadas. A primeira, localizada a sudeste do bloco, apresenta valores de cargabilidade inferiores a  $1,8 mV/V$ , o que indica a ausência de sulfetos disseminados. Nesta mesma região os valores de resistividade são inferiores a  $419 \Omega.m$ , este fato demonstra que no meio há percolação de água e que esta não apresenta sulfetos disseminados.

A segunda relação a ser analisada está localizada no extremo oposto do bloco-diagrama, região a qual foi relatado em campo que é bordejada por um talude e que devido o gradiente gravitacional, forma um fluxo hidrogeológico para o maciço em questão. Os valores de cargabilidade superiores a  $6 mV/V$  e valores de resistividade inferiores a  $37 \Omega.m$  corroboram a interpretação de que o fluxo hidrogeológico descendente percola em rochas sulfetada, interage com as mesmas dissolve o sulfeto e gera a Drenagem Ácida da Mina.

A última relação analisada está localizada no centro do maciço, esta região apresenta resistividade elevada, superior à  $15500 \Omega.m$ , e cargabilidade reduzida, inferior a  $1,8 mV/V$ , esta correlação condiz a presença de zonas silicificadas sem a ocorrência de sulfetos, as quais ocorrem devida presença de veios de quartzo sin-gênético ou processo supérgeno de laterização do solo.

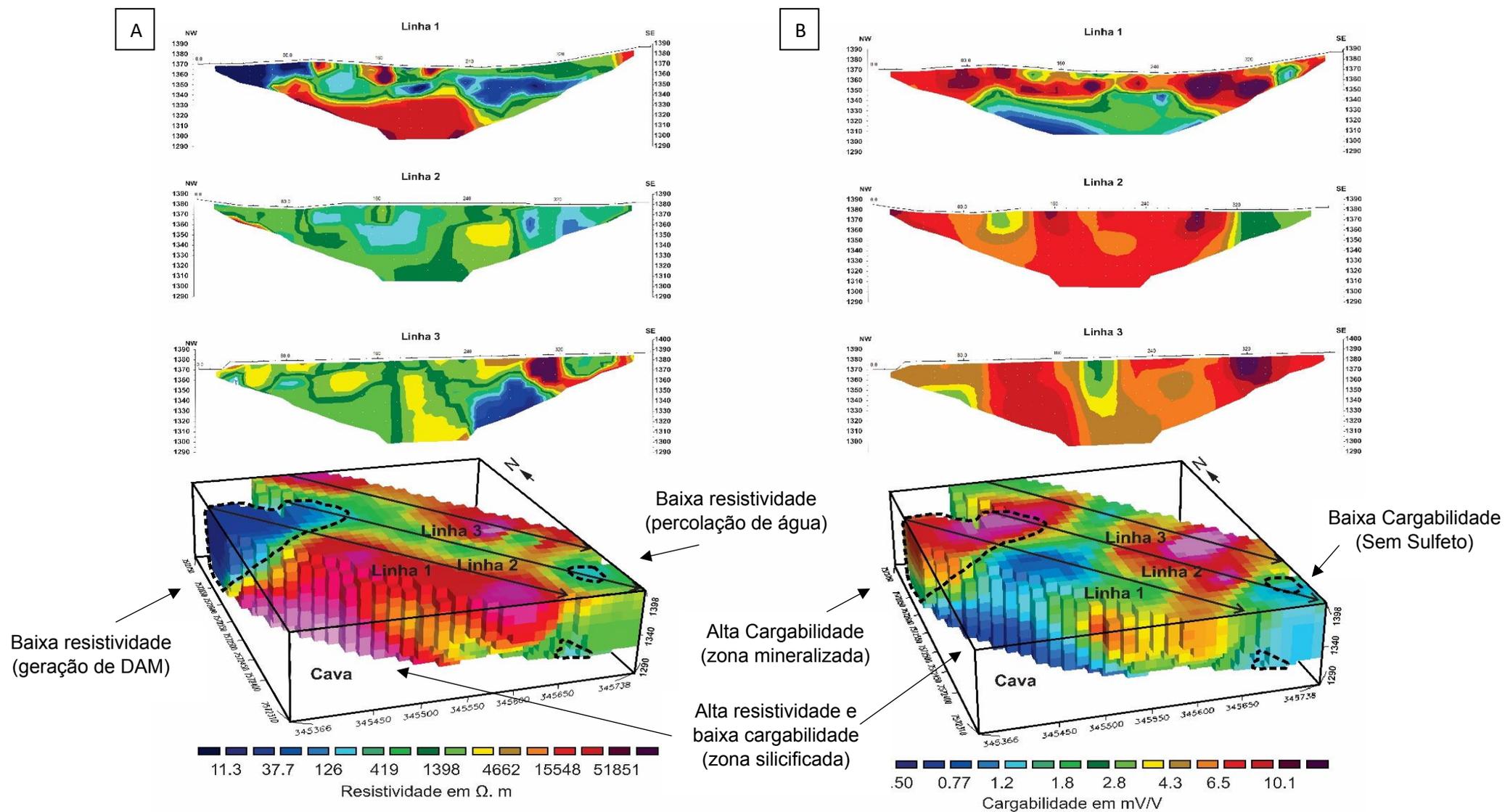


Figura 18: Bloco-diagramas formados a partir da inserção dos dados na plataforma Oasis Montaj Geosoft, (A) representa os dados de resistividade e (B) os dados de cargabilidade.

## 7 CONCLUSÕES

A análise estrutural do maciço rochoso permitiu a identificação dos principais eixos de intersecção com presença ou vestígios de fluxo d'água na frente de lavra NE, o que confirmou a presença de fluxo perpendicular à orientação do talude e que influencia na conectividade entre a água da cava e o fluxo intrínseco ao maciço.

O método de eletrorresistividade teve o objetivo de identificar as zonas saturadas, uma vez que estas apresentam baixa resistividade e seus valores são acentuados quando é gerada a drenagem ácida. A polarização induzida foi utilizada para identificar as zonas mineralizadas por sulfetos disseminados, pois estes apresentam elevada cargabilidade.

Desta forma, através dos perfis e bloco-diagramas gerados foi possível comparar os parâmetros e identificar as zonas mineralizadas por sulfeto disseminado concomitante às zonas saturadas por percolação de água que dão origem à drenagem ácida da mina.

A interpretação dos dados foi reforçada pelas observações em campo de morfologia do terreno e pelo levantamento de dados estruturais, que culminou na compreensão de duas situações atreladas à trama estrutural.

A primeira situação foi observada nos perfis da linha 1, onde formação de juntas estruturais sem interligação promovem o armazenamento da DAM no local onde ela é formada. A segunda situação está atrelada a conexão entre as fraturas de modo que a trama estrutural apresenta similaridade como uma rede de fraturas e permite a fluidez da DAM gerada em regiões de maior elevação.

Portanto o levantamento estrutural foi fundamental para interpretação dos dados geofísicos e para a compressão da dinâmica da geração da Drenagem Ácida da Mina, pois auxiliou na interpretação do fluxo subterrâneo e sua conectividade desde a superfície até a cava.

Reconhecidas as zonas de interação do fluxo com as zonas mineralizadas torna sólida a realização do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), uma vez que através de mecanismos impermeabilizantes das zonas de geração de DAM sejam aplicados. Uma proposta para o exposto é a injeção de cimento direcionado nas fraturas existentes, com o objetivo de preencher os

caminhos de percolação das águas meteóricas e bloquear a interação destas com os corpos mineralizados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEM. Terrameter SAS 4000 / SAS 1000 - Instruction Manual, 136p. New York, Cambridge University Press, p.493, 2006.
- AGNOLETTO, A.; LEITE, E. P. Identification of Exploration Gold Targets in the Alta Floresta Gold Province, Mato Grosso State, Brazil, Based on an Integrated Interpretation of Magnetic and Geoelectrical Data. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 33, n. 2, p. 305-318, 2015.
- 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). Tese de Doutorado em Geociências. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. p 194, 2017.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Brazilian Structural Provinces: an introduction. *Earth Sciences Review*, v.17, p.1-29, 1981.
- BRAGA, A. C. O. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 26, n. 1, São Paulo – SP, 2008.
- CAPOVILLA, M. N. G. M. Urânio nos hidrotermalitos potássicos (“rocha potássica”) da Mina Osamu Utsumi, Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG. Tese de doutorado em Mineralogia e Petrologia. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. p 227, 2001.
- CARVALHO, M. S.; FERREIRA, E. M. Estudo para eliminar metais radioativos e outros efluentes industriais pode recuperar águas para uso agrícola ou industrial. Resumo. 2000.
- CIPRIANI, M. Mitigação dos impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio. Tese (Doutorado em Ciências nas Áreas de Administração e Políticas de Recursos Minerais), Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. p 360, 2002.

DOMENICO, P.; SCHWARTZ, F. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, Nova York. 1990, p.824.

EDWARDS, L. A modified pseudosection for resistivity and ip. Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, v. 42, n. 5, p. 1020 –1036, 1977.

ELIS, V. R.; BARROSO, C. M. R.; CHANG, H. K. Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do Sistema Aquífero Barreiras/Marituba em Maceió – AL. Revista Brasileira de Geofísica, vol. 22, n. 2, São Paulo – SP, 2004.

ELLERT, R. Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, p. 5-63, 1959.

EVERETT, M. E. Near-surface applied geophysics. Cambridge University Press, 2013.

FIFTON, J. G. & UPTON, B. G. J. (Ed.) Alkaline Igneous Rocks. Geol. Soc. Spec. Publ. v. 30, p.568, 1987.

FIORI, A. P.; WANDERESEN, R. Tensões e Deformações em Geologia 1ª Ed. Rev. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

FOSSEN, H. Geologia Estrutural Tradução/ Fábio R. D. de Andrade.1ª Ed. Rev. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

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, 1985, p. 89-103.

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

FRASER, D.C., KEEVIL, N.B. and WARD, S.H. Conductivity spectra of rocks from the Craigmont ore environment. *Geophysics*, 1964, v.29, p. 832–847.

FREITAS, R. O. Ensaio sobre a tectônica moderna do Brasil. Boletim Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, USP, nº 130, Geologia, nº6. São Paulo, p. 120, 1951.

FRUCHTING, A.; BONIATTI, J. H.; HENRIQUE, e.; OLIVEIRA, G. D.; OLIVEIRA, S. B.; PIRES, P. F. R. Aplicação dos métodos eletromagnéticos aéreos e de polarização induzida espectral em mineralizações de cobre e zinco tipo VMS. 11th International Congress of Brazilian Geophysical Society, Salvador - BH, 2009.

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

GRAY, N. F. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology Journal*. v. 30, p. 62-71, 1996.

GRIFFITHS, D.; BARKER, R. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v.29, n. 3, p. 211–226, 1993.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração, Relatório Anual de Atividades, 2018. p. 29.

KEAREY, P, P.; BROOKS, M; HILL, I. An introduction to Geophysical Exploration. 3ª edição ed. London: Blackwell Science, 2002.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H.J. Environmental Geology Handbook of fields methods and case studies. Springer, 2007, p. 1357.

LAWN, B. R. & WILSHAW, T. R. (1975) Indentation fracture: principles and applications. *J. Mater. Sci.* 10 1049.

LIMA, O. A. L. Estruturas Geométrica e Hidroquímica do Sistema Aquífero Cristalino da Bacia do Alto Rio Curacá, Semi-Árido da Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, n 2, p. 445-461, 2010.

MOON, C. J. *et al.* Introduction to mineral exploration. [S.l.]: Blackwell publishing, 2006.

MOREIRA, C. A. & BRAGA, A. C. O. Aplicação do método de polarização induzida em aterro controlado. *Revista Geociências – UNESP*. V. 27, n. 2, 2008.

MOREIRA, C. A., LAPOLA, M. M., CARRARA, A. Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer. *Geofísica Internacional*, vol. 55, 2, p. 119 – 129, 2016.

MOURA, H.P. & MALAGUTTI FILHO, W. Método de Eletrorresistividade e de Polarização Induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro, SP. *Geociências*, v. 22, p. 129-139, 2003.

MUSSETT, A.E. & KHA, M.A. 2000. *Looking into the Earth: an introduction to Geological geophysics*.

NOBREGA, F. A.; LIMA, H. M.; LEITE, A. L. 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: Rev. Esc. Minas Ouro Preto – abr. - jun.*, v. 61 n. 2, 2008.

NUNES, A. R.; COSTA, A. F. U.; SILVA, L. G.; QUIRINO, L. F. B. Aplicação do método da polarização induzida nos arranjos gradiente e dipolo-dipolo como ferramenta de suporte à identificação de extensões da mineralização aurífera no depósito Ampari. 10th International Congress of Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro - RJ, 2007.

PASTORE, E. L.; MIOTO, J. A. Impactos ambientais em mineração com ênfase à drenagem mineira ácida e transporte de contaminates. *Solos e Rochas – Revista Latino-americana de Geotecnia*, 2000, v. 23. p. 33-53.

REYNOLDS, M. J. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 2<sup>a</sup> ed. 2011, p. 373 – 375.

RODRIGUES, J. A. Drenagem ácida do bota-fora 4 (Mina de urânio de Caldas – MG): aspectos hidroquímicos e hidrogeológicos. Dissertação. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto - MG. p. 270, 2001.

SANTOS, F. M. Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação de água subterrânea no lixão de Cuiabá – MT. Cuiabá. Dissertação em Física e Meio Ambiente) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso. 2005, p.88.

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. In: The Poços de Caldas Project: Natural Analogues of Processes in a Radioactive Waste Repository. Journal of Geochemical Exploration. 1992, v. 45, p.25-51.

SENGUPTA, M. Environmental impacts of mining – monitoring, restoration, and control. Lewis Publishers. 1993, v. 1, p. 167-259.

SHEA, M. E. Isotopic geochemical characterization of selected nepheline syenites and phonolites from the Poços de Caldas Alkaline Complex, Minas Gerais, Brazil. Journal of Geochem. Explor. 45, p. 179-214, 1992.

SUMNER, I. S., Principles of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier Scientific, Amstredam, p.227, 1978.

TELFORD W. M., GELDART L. P. & SHERIFF R. E. Applied Geophysics. 2 ed. Cambridge University Press, 1990, p.770.

ULBRICH, H.H.G.J. A petrografia e o quimismo de nefelina sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. São Paulo. Tese de Livre Docência – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, v. 2, p. 735, 1984.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Acid mine drainage prediction. Washington DC: Office of Solid Waste, Technical Document. 1994, p. 51.

VARGAS, A. L. Modelo probabilístico de distribuição tridimensional de descontinuidades em maciços rochosos fraturados. Tese de doutorado em geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília - DF, p. 26, 2001.

WABER, N.; SCHORSCHER, J. H. D.; PETERS, T. Hydrothermal and supergene uranium mineralization at Osamu Utsumi Mine, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. In: N. A. Chapman; I. G. Mckinley; M. E. Shea; J. A. T. Smallie (Editores), The Poços de Caldas Project: Natural Analogues of Processes in a Radioactive Waste Repository. Journal of Geochem. 1992. Explor. 45, p. 53-112.

WIJKMANN, L. O. Caracterização química e radiológica dos estéreis provenientes da mineração de urânio do Planalto de Poços de Caldas. Dissertação. Piracicaba, SP, p.98, 1998.