

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO-GEOTÉCNICO POR MEIO DE ANÁLISE
ESTRUTURAL NA MINA OSAMU UTSUMI (POÇOS DE CALDAS – MG)

Débora Andrade Targa

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Rio Claro (SP)

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

DÉBORA ANDRADE TARGA

DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO-GEOTÉCNICO POR MEIO DE ANÁLISE
ESTRUTURAL NA MINA OSAMU UTSUMI (POÇOS DE 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
2018

Débora Andrade Targa

**DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO-GEOTÉCNICO POR MEIO DE ANÁLISE
ESTRUTURAL NA MINA OSAMU UTSUMI (POÇOS DE 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

César Augusto Moreira (orientador)

MsC Pedro Lemos Camarero

MsC Fernanda Telles Gomes Rosa

Rio Claro, 14 de Junho de 2018.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

A caminhada foi árdua e repleta de desafios. Foram muitos os que cruzaram o meu caminho e que de certa forma contribuíram para que eu chegasse até aqui. Este trabalho é resultado de muito esforço e dedicação não só de minha parte, mas de várias pessoas que sacrificaram seu tempo, paciência e sonhos para que este ciclo fosse concluído. Os frutos desses seis anos e meio dedico àqueles que me permitiram criar asas e voar cada vez mais alto.

Agradeço ao Professor César por sua dedicação e compromisso com seus orientandos, sobretudo pelos conselhos e conversas tão enriquecedoras ao longo deste ano de trabalho. Sou grata pela confiança que depositou em mim, o que espero ter correspondido à altura de suas expectativas.

À INB por colaborar e permitir o desenvolvimento dos trabalhos de campo, com apoio técnico e acesso aos dados e à área de estudo. Ao Pedro Camarero pelos conselhos de vida, tanto pessoal quanto profissional, por me abrigar em São Paulo quando precisei e pela grande ajuda nos trabalhos de campo.

Aos meus pais, Carlos e Eliane, e à minha irmã, Júlia, exemplos de amor e garra, que fizeram de mim o que sou hoje. Agradeço por me mostrarem que a educação nos leva para onde quisermos, inclusive para a Irlanda. Meus eternos agradecimentos ao Bruno que sempre esteve ao meu lado, nos momentos bons e ruins, me fazendo crer que eu poderia ir cada vez mais longe.

Aos meus amigos, Saul pelas tardes de reflexão regadas a muito chimarrão e conversa boa. Ao Murilo por sempre levantar a minha autoestima e moral, mesmo nos dias mais desanimadores. À Melissa por lembrar de mim nos momentos mais inesperados, apenas para saber se estou bem e como as coisas estão. Ao Cica pela amizade e pelos questionamentos instigantes em horas oportunas. À Lia por sempre me receber com um grande sorriso acolhedor e ser um exemplo de pessoa e mulher. Ao Lula pelo carinho e amizade, e por ter um coração tão grande.

A vocês, meu muito obrigada!

*“Nada é mais transformador que a Educação.
O conhecimento muda as pessoas, o país e o mundo”*
(Paulo Freire)

RESUMO

A implantação de minas a céu aberto causa profundas alterações morfológicas e hidrológicas nas áreas onde são implementadas, muitas vezes com consequências negativas para o equilíbrio ecológico do meio. A Mina Osamu Utsumi, localizada na porção sudoeste do Estado de Minas Gerais, é um exemplo desse tipo de empreendimento que enfrenta sérios problemas ambientais relacionados à modificação do sistema hidrológico e da conformação natural de suas encostas. Um dos maiores problemas está relacionado ao grande volume de água que chega à área da cava e que necessita de tratamento químico em função da presença de metais pesados e elementos radioativos. Com a finalidade de entender o fluxo de água subterrâneo e identificar as famílias de fraturas que favorecem a entrada de água na cava da mina, o presente trabalho traz uma análise estrutural para o diagnóstico hidrogeológico das famílias de fraturas das quatro frentes de lavra, designadas como frentes NE, SE, SW e NW. Foram levantadas 755 medidas de planos de fraturas organizadas em estereogramas por meio do software Openstereo. Dois grandes sistemas de fraturamento foram identificados, o principal com direção NE e, subordinadamente, de direção NW, cuja direção de mergulho é NW e coincide com a direção de fluxo do sistema de drenagem do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. Ao analisar as frentes individualmente, nota-se que, em todas elas, a direção de mergulho dos planos de fratura se projeta para dentro da cava da mina em uma espécie de bacia coletora de águas. A presença de fluxos de água é reconhecida nos taludes das frentes SE, SW e NW sob a forma de manchas esbranquiçadas de caolinita e fluxos de água ativos que formam pequenos canais e fluem em direção a cava da mina. As famílias de fraturas se intersectam e formam canaletas que mergulham em direção cava, por onde é possível observar a surgência de água. É sugerido que os maciços rochosos que compõem a mina e o padrão de fraturamento configuram um sistema de aquífero em meio fraturado. O padrão de fraturamento também mostrou que, nas frentes SE e SW, há uma pré-disposição à ocorrência de escorregamentos planares e em cunha, cujos processos de dinâmica de encosta foram registrados nos taludes de rocha e impedem o acesso a algumas bancadas da mina, além de representar um risco ao bom funcionamento do empreendimento minerário. A frente NW também apresentou certa instabilidade, representada pela queda de blocos e matacões. A relação entre o plano da face do talude e a linha de intersecção entre os planos de fratura é outro fator que contribui para a instabilidade dos taludes e favorece a ocorrência dos fenômenos de escorregamentos.

Hydrogeological-Geotechnical diagnosis by structural analysis of Osamu Utsumi Mine (Poços de Caldas – MG)

ABSTRACT

The Osamu Utsumi Mine is located in the Poços de Caldas alkaline massif, in southwest region of Minas Gerais State. The mine goes through serious environmental issues due to the substantial volume of water provided by the pit area that need chemical treatment because of the presence of heavy metals and radioactive element. This work aims to understand the underground waterflows that flow through the discontinuities along the rock masses and supply water to the pit area. Thus, by a structural analysis of the main fractures systems of the four mining fronts, this work brings a hidrogeological-geotechnical diagnosis of the pit area. A total of 755 fractures planes were measured and organized on the Openstereo Software, which showed two main systems of fractures. The main one has strike to NE-SW and, subordinately, to NW-SE, whose dip direction is to NW and coincides to the regional drainage system direction. As the mining fronts have been analysed individually, it was noticed that, in all of them, the dip direction of fractures planes is projected into the center of the pit, working as a water basin collector. The presence of water is mainly observed in the fronts SE, SW and NW, illustrated by white stains of kaolinite and active water flows, like little streams. The fractures systems intersect each other and form gutters that canalize the waterflow toward the pit. It is suggested the rock masses and the fractures pattern set a fracture aquifer system. The fracture patterns also showed that the mining fronts SE and SW have a pre-arrangement to the occurrence of planar and wedge landslides, whose slope dynamics processes were recorded on the slopes and prevent access to some of the mine's benches, as well as representing a risk to the proper functioning of the mine. The front NW also showed some blocks and boulders along the slope base as a result of fall process. The relation between the plane of the slope face and the intersection line of fractures planes is another factor that contributes to slope instability and favours the landslide occurrence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Modos de propagação de fraturas por extensão perpendicular à superfície de fratura (I) e por cisalhamento perpendicular (II) e paralelo (III) à frente de propagação de ruptura.....	10
Figura 2 Movimentos de massa recorrentes em áreas de mineração e seus modelos teóricos Erro! Indicador não definido.	
Figura 3 Localização da Mina Osamu Utsumi, Município de Caldas – MG	15
Figura 4 Mapa Geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas e localização do perímetro pertencente a INB	18
Figura 5 Mapa geológico da Mina Osamu Utsumi	19
Figura 6 Modelo genético da mineralização de urânio no Complexo Alcalino de Poços de Caldas	22
Figura 7 Sistema de drenagens do Planalto de Poços de Caldas	23
Figura 8 Representação dos tipos de aquíferos presentes na área de estudo	24
Figura 9 Cava da Mina Osamu Utsumi e as quatro frentes de lavras onde foram feitos os levantamentos estruturais	27
Figura 10 Disposição das bancadas onde foram levantados os dados estruturais das frentes de lavra	29
Figura 11 Representação de diagramas de roseta como um círculo completo (360°) e meio círculo (180°)	30
Figura 12 Rede de projeção estereográfica de Wulff (a) e de Schmidt (b)	31
Figura 13 Exemplo de interface do software Openstereo	31
Figura 14 Principais tipos de escorregamentos em vertentes e suas representações estereográficas correspondentes	32
Figura 15 Fraturas regionais extraídas do Maciço Alcalino de Poços de Caldas.....	34
Figura 16 Contraste entre a rocha fonólito e a formação de solo esbranquiçado originado pela sua alteração.....	35
Figura 17 Formação de óxido de manganês caracterizado por alterações de coloração escura....	36
Figura 18 Estereograma com 755 medidas estruturais e as direções preferenciais das famílias de fraturas	37
Figura 19 Distribuição das frequências de direção de mergulho dos planos de fratura	37
Figura 20 Estereograma dos planos de fratura da frente SE	38
Figura 21 Distribuição das frequências das direções de mergulho da frente SE.....	38
Figura 22 Indícios de percolação de água representados por manchas esbranquiçadas nos maciços fraturados (linhas amarelas) e surgência de água nos taludes na frente de lavra SE.....	39
Figura 23 Linha de intersecção dos planos de fratura na frente SE	40

Figura 24 Acúmulo de blocos e matações na base do talude da frente SE	41
Figura 25 Superfície de escorregamento planar em três bancadas da frenteSE	41
Figura 26 Escorregamentos em cunha identificados na frente SE	42
Figura 27 Estereograma dos planos de fraturas da frente NE	42
Figura 28 Distribuição das frequências de direção de mergulho das fraturas da frente NE.....	43
Figura 29 Vista geral da frente NE, destaque para a ausência de indícios de fluxo de água	43
Figura 30 Estereograma com os planos de fratura da frente NW.....	44
Figura 31 Distribuição das frequências de direção de mergulho dos planos de fraturas	44
Figura 32 Intensa percolação de água na frente de lavra NW	45
Figura 33 Estereograma com os planos de fratura da frente SW	46
Figura 34 Distribuição das frequências de direção de mergulho dos planos de fraturas	46
Figura 35 Indícios de percolação de água na frente de lavra SE e o sistema de fraturas relacionadas à passagem de fluido.....	47
Figura 36 Escorregamento em cunha registrado na frente SW	48
Figura 37 Acúmulo de blocos e matações na base do talude da frente SW	48
Figura 38 Linha de intersecção dos planos de fratura na frente SW	49
Figura 39 Padrão de drenagem condicionado ao controle estrutural de fraturas regionais próximo à Mina Osamu Utsumi.....	51
Figura 40 Persistência das discontinuidades nas frente de lavra	52
Figura 41 Direção do fluxo dos Córregos do Cercado e Consulta em relação às frentes de lavra	53
Figura 42 Relação angular entre o plano de fratura e a face do talude em condições instáveis...	55
Figura 43 Condições estruturais para a ocorrência de escorregamento em cunha na frente SW	56
Figura 44 Identificação dos principais problemas geotécnicos observados em cada frente de lavra	57
Figura 45 Instrumentação para o monitoramento e controle geotécnico de taludes	58
Figura 46 Estabilização de talude por drenos horizontais profundos.....	60
Figura 47 Obrasde estabilidade de taludes por ancoragem ativda – tirante (acima) e passiva – chumbador (abaixo).....	61

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	5
2.	OBJETIVO.....	7
3.	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	8
3.1	Drenagem ácida de mina (DAM).....	8
3.2	Aquífero fraturado.....	9
3.3	Análise estrutural em mineração.....	11
3.4	Movimentos de massa em taludes de mineração.....	12
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	15
4.1	A Mina Osamu Utsumi.....	15
4.2	Geologia Regional.....	17
4.3	Geologia Local.....	19
4.4	Metalogênese.....	20
4.5	Hidrologia.....	22
4.6	Hidrogeologia.....	23
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
5.1	Levantamento bibliográfico.....	28
5.2	Levantamento de dados estruturais.....	28
5.3	Análise estrutural.....	29
5.4	Análise geotécnica.....	32
5.5	Integração dos resultados e elaboração da monografia.....	33
6	RESULTADOS.....	34
6.1	Estruturas regionais.....	34
6.2	Caracterização das frentes de lavra da Mina Osamu Utsumi.....	35
6.2.1	Frente de lavra SE.....	37
6.2.2	Frente de lavra NE.....	42
6.2.3	Frente de lavra NW.....	44
6.2.4	Frente de lavra SW.....	46
7	DISCUSSÃO.....	50
7.1	Diagnóstico hidrogeológico.....	50
7.2	Diagnóstico geotécnico.....	54
7.3	Soluções geotécnicas para estabilidade em taludes de mineração.....	56
8	CONCLUSÕES.....	63
9	REFERENCIAS.....	64

1. INTRODUÇÃO

A implantação de um empreendimento mineiro tem consequências imediatas no ambiente, frequentemente negativas e com impacto direto no equilíbrio ecológico. Um dos aspectos mais impactantes na dinâmica local consiste na construção da cava em minas à céu aberto. Conforme as escavações avançam, os processos geológicos, hidrogeológico e geotécnicos são concomitantemente adaptados à nova realidade local. O rebaixamento do nível d'água e represamento de lagoas de decantação, assim como modificações no sistema de drenagens e na conformação morfológica pela disposição de pilhas de rejeito e retaludamento, são exemplos de interferências ambientais ocasionadas pela implantação de minas à céu aberto.

A construção da Mina Osamu Utsumi, próximo ao município de Poços de Caldas – MG, contribuiu para a alteração do padrão natural dos fluxos hidrológicos tanto em superfície quanto em subsuperfície, assim como a conformação de suas encostas naturais (HOLMES *et al.*, 1992). O avanço das escavações causou o desconfinamento dos maciços rochosos, o que gerou um alívio de tensões e contribuiu para o aumento das descontinuidades (ZEA HUALLANCA, 2004; CURI, 2014). Estas podem condicionar um desvio hidrológico e percolação de água por caminhos preferenciais, além de contribuir para mecanismos de ruptura em taludes de rocha (ROSTIROLLA *et al.*, 2002; REIS, 2010).

No caso de exploração de insumos minerais associados a sulfetos, como é o caso do urânio na Mina Osamu Utsumi, a percolação de água em fraturas dos maciços rochosos contribui para a formação de drenagem ácida. Esta é resultado da oxidação dos minerais sulfetados, principalmente a pirita (FeS_2), na presença de água e oxigênio. A redução do pH das águas provoca a solubilização de metais pesados encontrados tanto nos maciços rochosos quanto nas pilhas de estéril, como Cu, Ni, Cd, U, Mn e Zn, com incremento da mobilidade e risco de carreamento para as drenagens da região, com impactos diretos nos mananciais superficiais e subterrâneos (CARVALHO *et al.*, 2000).

A drenagem ácida é bombeada para estações de tratamento no qual é adicionado cal hidratada para elevação do pH e floculante para precipitação de radionuclídeos e metais pesados. Após o tratamento, as águas são lançadas no ambiente e o resíduo é estocado na cava da mina, que hoje se constitui em um grande reservatório de água ácida (MURTA *et al.*, 2008). O problema reside no grande volume de água a ser tratado e nos gastos para a manutenção do

sistema de tratamento, sendo que, no período entre 1994 e 2001, foram tratados aproximadamente 18 milhões de metros cúbicos de drenagem ácida a um custo de US\$1,2 milhões somente em insumos (CIPRIANI, 2002). A perspectiva é de que as drenagens ácidas perdurem por séculos, com custos de manutenção exorbitantes (MURTA *et al.*, 2008).

Outro problema relevante relacionado ao fraturamento dos maciços consiste na ocorrência de movimentos de massa, como escorregamentos e quedas de blocos. O padrão de fraturamento e a presença de água são fatores determinantes para a instabilidade dos taludes, por induzir a saturação dos maciços, promover aumento das poropressões, resultar na eliminação de tensões capilares e da cimentação e impor forças de percolação na direção do fluxo (REIS, 2010). A disposição e geometria dos taludes deve considerar a presença das descontinuidades e a heterogeneidade dos maciços rochosos com a finalidade de otimizar a exploração do minério e assegurar a estabilidade das encostas (CURI, 2014).

O levantamento e análise estrutural das famílias de fraturas nos maciços se faz necessário para a identificação das descontinuidades que favorecem a entrada de fluxos d'água para dentro da cava e sua relação com as estruturas regionais, além daquelas que podem condicionar a ocorrência de ruptura nos taludes de rocha. Assim, essa ferramenta é capaz de fornecer subsídios para entender o fluxo preferencial das drenagens, permitindo o uso de medidas remediadoras para a redução do fluxo de drenagem para dentro da cava e, conseqüentemente, dos gastos para o tratamento de drenagem ácida., prever pontos de instabilidade nos taludes de rocha para evitar a ocorrência de escorregamentos e quedas de blocos.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo uma análise estrutural dos maciços rochosos na Mina Osamu Utsumi, a fim de obter um diagnóstico hidrogeológico-geotécnico das frentes de lavra, além da proposição de soluções geotécnicas para a estabilidade dos taludes de mineração.

3. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

3.1 Drenagem ácida de mina (DAM)

Atividades mineiras provocam profundas mudanças ambientais nas regiões onde são implantadas. Uma delas consiste na exposição de minerais sulfetados, antes inseridos em um contexto redutor, a condições oxidantes com presença de água e oxigênio. Esses íons em contato com a água têm o potencial de formar ácido sulfúrico com consequente redução do pH e qualidade da água, o que caracteriza o fenômeno de drenagem ácida de mina (DAM).

As drenagens ácidas são conhecidas pelos seus baixos índices de pH que solubilizam metais pesados e transporta-os até o sistema de drenagem da região com filtração no solo e maciços rochosos fraturados em áreas próximas à mina. Esses fluxos d'água são provenientes principalmente da pilha de estéril e da bacia de rejeitos da mina Osamu Utsumi onde são encontrados altos teores de pirita (FeS_2).

O fenômeno de drenagem ácida é observado desde o início das operações da mina Osamu Utsumi em 1977 (MURTA *et al.*, 2008). Inicialmente, as drenagens ácidas provenientes dos resíduos da mina eram lançadas diretamente nos córregos Consulta e Cercado. Porém, após a constatação dos danos ambientais causados por essas águas, sua coleta e tratamento passaram a ser procedimentos obrigatórios. As águas são, então, bombeadas para estação de tratamento de águas marginais da mina onde é adicionado cal hidratada, para elevar o nível de pH, e flocculantes que auxiliam na etapa de separação sólido-líquido. A manutenção do tratamento das drenagens ácidas tem um forte impacto econômico para INB que, no período entre 1994 e 2001, gastou aproximadamente US\$ 1,2 milhão apenas com os corretivos dos efluentes ácidos gerados pela mina. O problema é que o volume de água a ser tratado só aumenta e, segundo Fernandes e Franklin (2001), é estimado que a duração da drenagem ácida seja de no mínimo 200 anos para a bacia de rejeitos e 600 anos para a pilha de estéril, o que implica em medidas permanentes de remediação para o tratamento das drenagens.

O fenômeno de drenagem ácida é definido como a formação de ácido sulfúrico, devido à interação entre água/ar e rocha que causa a oxidação dos sulfetos presente nos maciços, e elevadas concentrações de metais dissolvidos (CARVALHO *et al.*, 2000). A remoção de solo ou material rochoso e a formação de zonas de fraturas durante o processo de mineração expõe os minerais sulfetados a condições mais oxidantes. Esses minerais são estáveis em condições

subsuperficiais, mas, ao serem expostos ao oxigênio, umidade e agentes biológicos (bactérias) existentes na superfície, são rapidamente oxidados podendo gerar acidez (FRANKLIN, 2007). Dentre os vários sulfetos existentes, a pirita (FeS_2), devido a sua relativa abundância na crosta terrestre, é comumente o mineral associado à formação de drenagem ácida, a exemplo do que acontece na Mina Osamu Utsumi.

A reação de oxidação da pirita é um processo complexo, constituído de várias etapas, cujo produto final consiste na conversão do íon sulfeto em sulfato na presença de oxigênio e resulta em ácido sulfúrico, e na formação de íon férrico. O processo de oxidação é catalisado pela atividade bacteriana da *T. Ferrooxidans* (KLEINMANN *et al.*, 1981). A presença do ácido torna o pH do ambiente mais ácido e aumenta a mobilidade de metais pesados como arsênio, cádmio, zinco e urânio, eventualmente presentes nos depósitos de rocha e solo. Esses metais podem então ser transportados pelo sistema de drenagens da região e posteriormente podem atingir mananciais superficiais ou mesmo subterrâneos. O ambiente mais ácido também potencializa a ação oxidante do íon férrico, o que permite a oxidação de mais pirita e estabelece uma reação autocatalítica (FRANKLIN, 2007).

3.2 Aquífero fraturado

As rochas ígneas e metamórficas são designadas como rochas cristalinas e caracterizadas por baixa porosidade intergranular, sendo que por muito tempo foram consideradas impermeáveis. O armazenamento de água subterrânea nesse tipo de rocha ocorre de duas formas: no manto de alteração (aquífero freático) ou nas discontinuidades do maciço rochoso (aquífero fraturado).

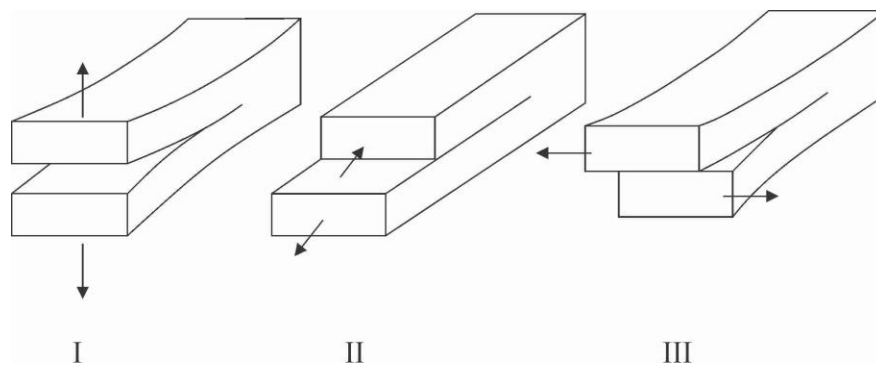
As rochas superficiais estão sujeitas à ação intempérica, que provocam alterações físicas e químicas e criam condições para a formação um manto de alteração. Essa frente de alteração é essencialmente constituída por saprolito ou material inconsolidado proveniente da rocha do embasamento, caracterizado pela alta porosidade e por favorecer a infiltração e transporte de água. O manto de alteração constitui uma importante zona de recarga para o aquífero cristalino e pode, inclusive, ser uma fonte de captação de água.

O armazenamento de água subterrânea em rochas não-intemperizadas, por outro lado, é controlado pelas discontinuidades do maciço rochoso que configura uma porosidade secundária.

Os fluxos de água subterrâneos são controlados pela densidade de fraturas, abertura e conectividades entre elas e o sentido de fluxo é influenciado pela direção e mergulho dos planos de descontinuidade (DOMENICO e SHWARTZ, 1990). As fraturas são geradas em resposta à deformação rúptil e dependem do comportamento geomecânico das rochas submetidas a esforços mecânicos impostos por eventos tectônicos, alívio de pressão, compressão, entre outros mecanismos (FANTI, 2015).

A resistência da rocha à ruptura é uma característica intrínseca à sua formação e que depende de inúmeros fatores, como composição, tamanho dos grãos, idade da rocha, presença de descontinuidades prévias, propriedades geomecânicas e o grau de alteração. Os diferentes comportamentos das rochas podem conferir diferentes graus de fraturamento em um mesmo maciço, o que confere um caráter anisotrópico e heterogêneo para o meio. Assim, os cenários tectônico e geológico são fatores fundamentais na análise dos aquíferos fraturados (FERNANDES, 1997). A abertura das fraturas depende do mecanismo de propagação da descontinuidade, que por sua vez é controlado pelos esforços atuantes na rocha. As fraturas podem ser geradas por esforços de tração, no qual ocorre uma abertura ou separação normal aos planos de ruptura, ou por esforços de cisalhamento, que podem ser perpendiculares ou paralelos à frente de propagação da ruptura (LAWN e WILSHAW, 1993) (Figura 1). A identificação dos diferentes tipos de fratura contribui para o entendimento dos caminhos preferenciais para a percolação de fluxos de água em maciços rochosos, uma vez que o modo de propagação da fratura exerce grande influência sobre a sua abertura.

Figura 1 Modos de propagação de fraturas por extensão perpendicular à superfície de fratura (I) e por cisalhamento perpendicular (II) e paralelo (III) à frente de propagação de ruptura



Fonte: Modificado de Lawn e Wilshaw (1993) por Fanti (2015)

3.3 Análise estrutural em mineração

Os levantamentos estruturais em áreas de mineração contribuem para a otimização do processo de extração do minério e a definição de áreas de instabilidade que possam, de alguma maneira, impedir o bom funcionamento do empreendimento. O tipo de análise estrutural depende basicamente do objetivo do estudo, que pode envolver problemas de caráter geotécnico, ambiental, hidrogeológico, metalogenético e/ou prospectivo.

Um dos aspectos envolvidos na caracterização estrutural é a análise da distribuição espacial e geometria das zonas de falhas e fraturas para estudos geotécnicos. Essas descontinuidades são responsáveis pela anisotropia do meio e interrompem a continuidade física dos maciços rochosos, o que favorece tanto os processos de dinâmica de encosta quanto a intensificação dos processos intempéricos e alteração das características físicas das rochas. Como consequência, são criados pontos de instabilidade nos taludes de mineração e que podem comprometer a infraestrutura e a segurança da mina. O aspecto mais importante no estudo de estabilidade de talude em rocha consiste na orientação das descontinuidades em relação à face do talude, o que torna de fundamental importância o entendimento da geologia estrutural local (SCARPELLI, 1994).

Outro ponto relevante no estudo da geologia estrutural consiste na análise de intersecções de falhas e fraturas. O encontro de duas ou mais famílias de descontinuidades viabiliza a canalização e a percolação de fluxos nos maciços rochosos, cujo processo possibilita a remobilização de elementos e formação de depósitos supérgenos. O estudo dos padrões de fraturamento fornece ferramentas para compreensão da dinâmica hidrogeológica e permite prever as zonas mineralizadas, o que otimiza as etapas de prospecção e exploração do minério.

Em geral, as estruturas locais estão diretamente relacionadas às estruturas regionais e aos eventos geotectônicos responsáveis pelos episódios de deformação. Em outras palavras, qualquer tipo de processo que venha a ocorrer em escala local, será refletido em escala regional. Como exemplo, a Mina Osamu Utsumi enfrenta problemas relacionados à geração de drenagem ácida que percola as fraturas dos maciços e pilhas de estéréis de modo local. O fato das descontinuidades estarem interligadas com o sistema de falhas e fraturas regionais faz com que o problema das drenagens ácidas seja transferido para todo o maciço de Poços de Caldas.

3.4 Movimentos de massa em taludes de mineração

A lavra a céu aberto é vantajosa quando o minério está situado próximo a superfície ou a profundidades moderadas. Neste caso, é importante que a geometria da cava seja cuidadosamente planejada para que a extração do minério seja otimizada, mas ao mesmo tempo garanta a estabilidade dos taludes.

Um dos problemas associados à modificação da conformação natural de encostas consiste na quebra do equilíbrio entre as forças atuantes no maciço e a sua resistência, fatores que provocam sua instabilidade e consequente ocorrência de movimentos de massa, que podem comprometer a segurança e viabilidade operacional do empreendimento mineiro. O estado de tensões naturais do maciço em minas a céu aberto é perturbado conforme as escavações avançam. O vazio criado pela retirada de rochas resulta na redistribuição de tensões nas bordas da cava, com desconfinamento do maciço rochosos e aumento da probabilidade de movimentação de blocos (ZEA HUALLANCA, 2004). Esse cenário provoca a abertura de fendas pré-existentes e, a diminuição da tensão normal (diminuição da resistência ao cisalhamento), configura uma zona com sérios riscos de escorregamento (SJÖBERG, 1999; HOEK *et al.*, 2000; ZEA HULLANCA, 2004).

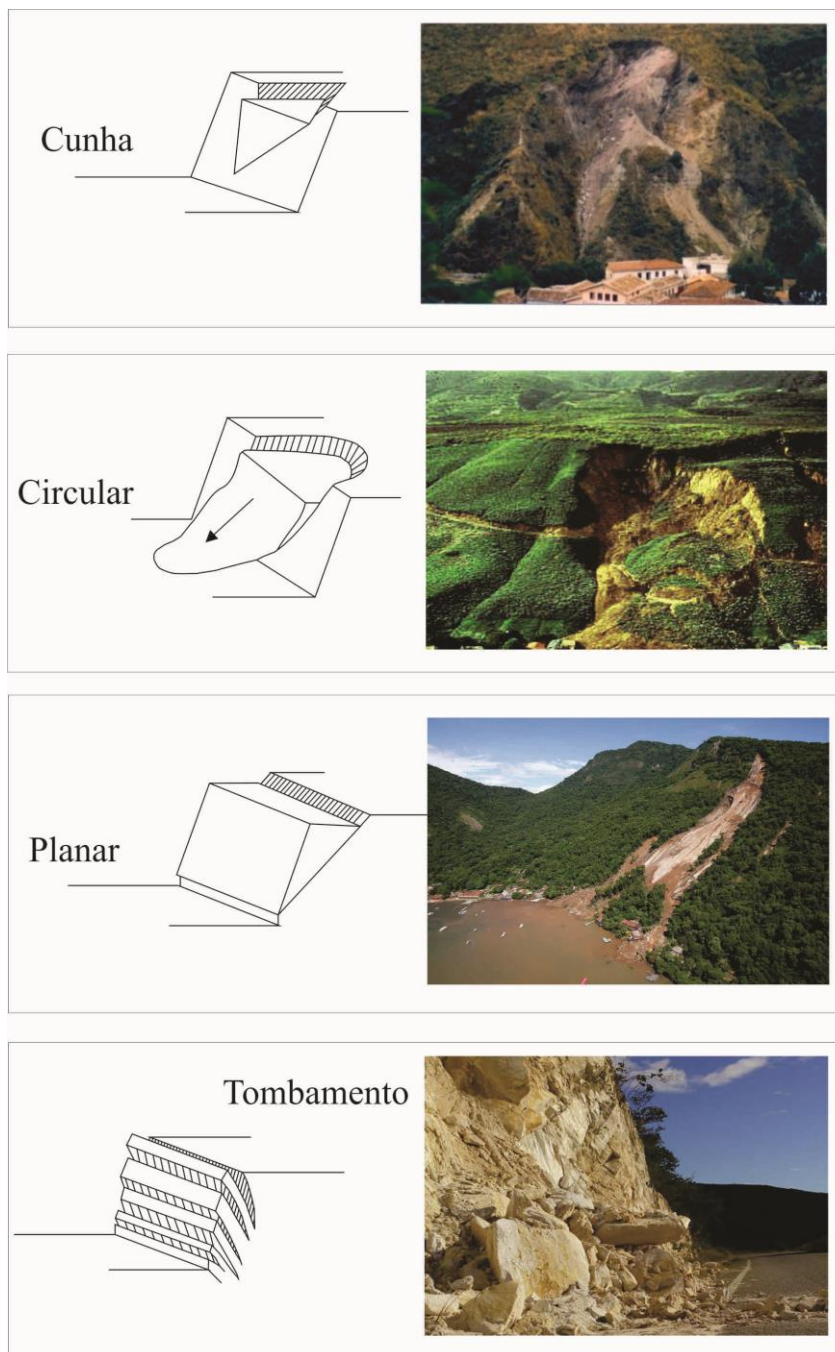
Outro fator que contribui para a instabilidade de taludes é a presença de água em superfícies de descontinuidades, como falhas e fraturas. Um agravante em áreas de mineração é a exposição do nível freático durante o avanço das escavações ou com mudanças na conformação do terreno, que compromete tanto a operação mineira quanto a estabilidade geotécnica do maciço devido a lubrificação de planos preferenciais de fluxo. Outro efeito da presença da água é visto por meio de minerais expansivos que preenchem as fraturas e muitas vezes podem contribuir para a ocorrência de escorregamentos.

Os movimentos de massa mais recorrentes em taludes de mineração são principalmente escorregamentos, queda e tombamento de blocos (Figura 2). Estes são classificados conforme o padrão de ruptura e o tipo de material geológico deslocado, fenômenos condicionados pelo grau de fraturamento do maciço rochoso e pela orientação das descontinuidades em relação ao talude.

O termo ruptura é definido como a formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo ou no maciço rochoso (GERSCOVICH, 2013). Portanto, existe uma camada de solo/rocha em torno da superfície de cisalhamento que perde suas características durante o processo de ruptura e forma uma zona cisalhada. Essas superfícies aos serem expostas pelas

escavações estão sujeitas à ação de processos intempéricos, o que contribui para a alteração das propriedades químicas e físicas do material geológico. Esse cenário induz uma instabilidade nas encostas, uma vez que o material resultante da alteração da rocha possui baixa resistência e propício a ruptura (Figura 2).

Figura 2 Movimentos de massa recorrentes em áreas de mineração e seus modelos teóricos



Fonte: Hoek e Bray (2004)

Os escorregamentos são subdivididos em ruptura planar, em cunha e circular. A ruptura planar consiste no deslocamento de material geológico ao longo de uma superfície pré-existente, podendo ser uma estratificação, junta tectônica, falha, entre outras. A condição básica para a ocorrência desse tipo de escorregamento é a descontinuidade mergulhar a favor do talude e com a mesma direção, desde que o ângulo de mergulho do talude seja maior do que da descontinuidade e este, por sua vez, maior que o ângulo de atrito interno. A ruptura em cunha corresponde ao deslizamento de um bloco rochoso na forma de cunha, formado a partir do encontro de duas ou mais famílias de descontinuidades. Neste caso, o ângulo de mergulho do talude deve ser maior do que o ângulo de mergulho da linha de intersecção dos planos e este maior que o ângulo de atrito interno. A ruptura circular geralmente ocorre em maciços rochosos pouco competentes, muito alterados ou intensamente fraturados, e apresenta um comportamento isotrópico, nos quais os planos de descontinuidades não controlam o comportamento mecânico e fazem com que o maciço se comporte como um solo.

O tombamento de blocos deve-se a sua forma e a seu peso (GUIDICINI e NIEBLE, 1976). A força vertical decorrente do próprio peso do bloco, apoiado em um plano inclinado, pode levá-lo a um equilíbrio instável em relação a sua base. As descontinuidades, neste caso, apresentam um mergulho contrário à inclinação do talude e direção paralela ou subparalela ao mesmo. Em geral, os blocos são individualizados por um sistema de descontinuidades ortogonais e sua estabilidade não está unicamente condicionada pela resistência ao deslizamento. A queda de blocos atua como um processo deflagrado pela gravidade, relacionado a taludes ou encostas íngremes em movimentos do tipo queda livre.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

4.1 A Mina Osamu Utsumi

O Complexo Mineiro Industrial de Poços de Caldas (CIPC), operado pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB), foi o primeiro centro de produção de urânio do Brasil. O complexo está localizado no Planalto de Poços de Caldas, na região sudoeste do Estado de Minas Gerais, mais especificamente no município de Caldas, com uma área de 15km² (figura 3).

Figura 3. Localização da Mina Osamu Utsumi, Município de Caldas – MG



Fonte: autoria própria

A descoberta de jazidas promissoras de caldasito, uma mistura de zircão (silicato de zircônio) e baddeleyita (óxido de zircônio) propiciou o início da construção da Mina Osamu Utsumi em 1959, quando foram descobertas expressivas mineralizações de urânio (MACIEL, 2007). As atividades tiveram início em 1981, com exploração em mina à céu aberto, e foram encerradas em 1995 com o esgotamento da jazida. Sua reserva foi calculada em aproximadamente 17200 toneladas de U₃O₈ (SOUZA *et al.*, 2013). Durante os anos de operação, foram produzidas 1242 toneladas de diuranato de amônio (*yellow-cake*), gerados 4,48 x 10⁷ m³ de

rejeitos de mineração e aproximadamente $2,39 \times 10^6 \text{ m}^3$ de rejeitos de beneficiamento químico, conhecidos como “tailings” (URÂNIO DO BRASIL, 1988; MAJDALANI e TAVARES, 2001; FRANKLIN, 2007).

As principais atividades desenvolvidas pelo CIPC foram a lavra e o beneficiamento do minério de urânio e produção do *yellow-cake*, usado como matéria prima para a produção dos combustíveis nucleares. O processo operacional da mina era dividido em três etapas: a mineração, o processamento físico e o processamento químico. A lavra de minério teve início em 1981, após os trabalhos de decapagem e pré-lavra. O teor de corte definido foi de 170 ppm de U_3O_8 solúvel recuperado na usina, com teores inferiores a 170 ppm considerados estéreis e constituíam o rejeito de mineração. 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 minério lavrado passava por beneficiamento físico, em etapas de britagem, moagem e espessamento, com o objetivo de reduzir a granulometria do minério para ser transportado para a unidade de beneficiamento químico. Durante a etapa de britagem, era adicionada pirolusita (MnO_2) para promover a oxidação do U^{+4} para U^{+6} assim separado, além de rocha fosfática na forma de ácido fosfórico que auxilia na precipitação de zircônio e reduz o teor deste metal a níveis aceitáveis no produto final (*yellow cake*). Ao material em fase de moagem e espessamento era adicionado água tratada com cal, que resulta numa polpa neutra com 55% de sólidos que era bombeada para a usina de beneficiamento químico. A última etapa do processo consistia no beneficiamento químico, no qual a polpa de minério era submetida a um tratamento químico para a concentração de urânio sob a forma de diuranato de amônio (*yellow cake*) e recuperação de molibdênio na forma de molibdato de cálcio (FRANKLIN, 2007).

Atualmente a Mina Osamu Utsumi está em fase de descomissionamento e recuperação ambiental. A INB firmou um compromisso em conjunto com o IBAMA, CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) e FEAM (Fundação Estadual de Meio Ambiente de MG) no qual está comprometida a apresentar um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD).

As principais fontes de contaminação da Mina Osamu Utsumi são sedimentos e água da bacia de rejeitos, águas da cava da mina e das pilhas de estéril, águas caracterizadas pelo baixo pH e consequente elevado teor de metais e radioativos, denominada drenagem ácida. As águas que atingem a cava da mina provem do fluxo num complexo sistema de fraturas e juntas, cuja

interação com minério residual da base da cava, resulta num efluente ácido e enriquecido em elementos radioativos.

4.2 Geologia Regional

A Mina Osamu Utsumi está inserida no contexto geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, que consiste em uma estrutura vulcânica de forma circular com cerca de 35km de diâmetro delimitada por escarpas de falha que afetaram o embasamento cristalino (ALBERTI, 2008). Encontra-se na porção meridional do Escudo Atlântico, próximo a borda nordeste da Bacia do Paraná, no contexto do Maciço Meridiano de Guaxupé.

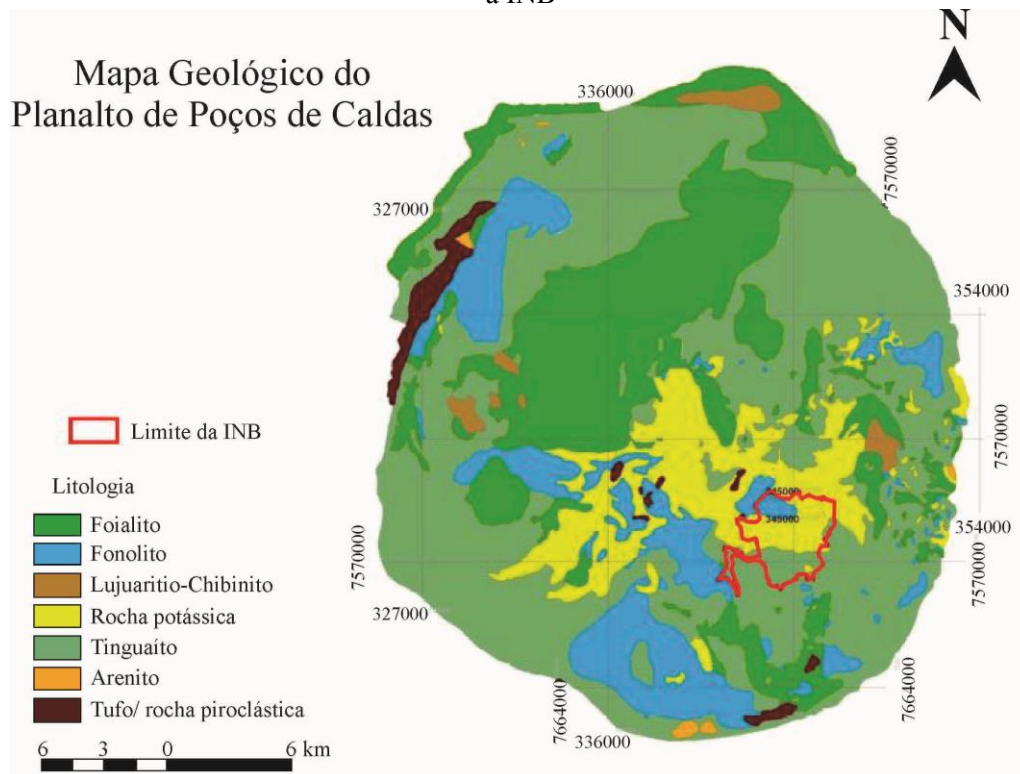
As principais litologias descritas no Maciço Alcalino de Poços de Caldas são fonólitos, nefelina sienitos, tinguaitos, foiaítos, rochas piroclásticas supracrustais e intratélúricas, além de rochas sedimentares epiclásticas (GARDA, 1990) (Figura 4). Os fonólitos são a litologia predominante do maciço e cobrem cerca de 70% da área, encontrados principalmente nas porções NW e SW e extremamente fraturados e brechados. O embasamento cristalino é aflorante nas regiões que circundam a intrusão alcalina, formado por granitos e gnaisses que são frequentemente cortados por diques de diabásio, anfíbolito e tinguaito (ELLERT, 1959).

A evolução do Maciço Alcalino de Poços de Caldas segue o modelo geológico de formação de caldeira proposto por Ulbrich e Ulbrich (1992). A fase inicial consiste na intrusão de rochas félsicas que se estendeu entre 89Ma e 54Ma (SONOKI e GARDA, 1988; ULBRICH e ULBRICH., 2000). Houve um domeamento com posterior colapso e formação de estrutura em caldeira, seguida por intrusões de tinguaitos, nefelina sienitos e fonólitos ao longo de fendas (ELLERT, 1959; ULBRICH e ULBRICH, 1992). A formação de caldeiras resulta principalmente de processo de subsidência ou colapso do material vulcânico extravasado (HOLMES et al., 1992).

O Maciço Alcalino de Poços de Caldas possui um número significativo de discontinuidades, falhas e fraturas. O Planalto de Poços de Caldas apresenta dois grandes sistemas de falhas com direções predominantes N40E e N60W, cuja primeira está relacionada com o processo formador da caldeira e o segundo com a tectônica regional (FRAENKEL *et al.*, 1985), além da existência de falhas de direção transversal à estrutura anelar que afetaram todo o maciço alcalino. O maciço alcalino possui ainda estruturas circulares associadas à presença de cones vulcânicos no interior do maciço. A formação do sistema de falhas presente na região é

resultado do fenômeno de reativação tectonomagmática da plataforma Sul-Americana durante o Mesozóico (ALMEIDA, 1986). Essa reativação tectônica é uma das consequências da fragmentação do Gondwana, que teria causado um alívio de tensões ocorrido pela rotação da placa sul-americana e a geração e reativação de fraturas pré-existentes.

Figura 4 Mapa Geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas e localização do perímetro pertencente a INB



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

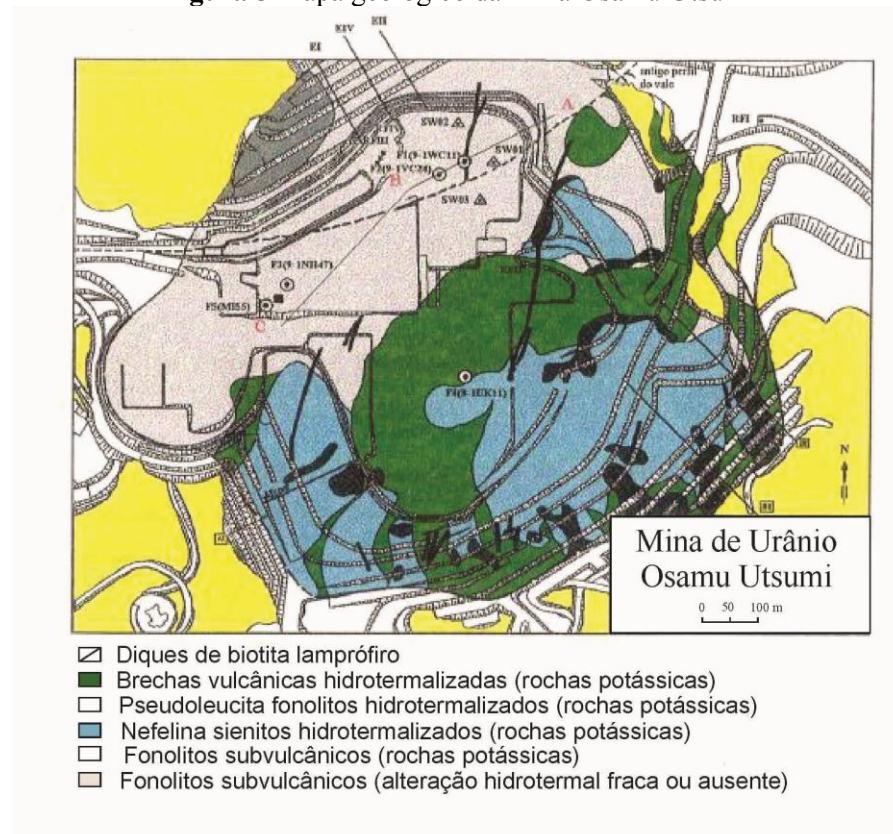
Autores como Marsh (1973), Herz (1977), Fletcher e Litherland (1981) e Sadowski (1987) afirmam que a origem das ocorrências alcalinas no Brasil está relacionada com a separação das placas da América do Sul e África e às estruturas resultantes da separação. Freitas (1951) associa as intrusões alcalinas com os fenômenos tectônicos responsáveis pela formação das serras do Mar e da Mantiqueira. As intrusões alcalinas do território brasileiro se estendem ao longo de duas direções principais, NE e NW, praticamente normal entre si, cuja intrusão alcalina de Poços de Caldas está associada à direção NW. Freitas (1951) considera que o arqueamento do escudo cristalino no sul do Brasil, com direções NW e NE, teria produzido tensões regionais em grande

escala e possibilitado a ascensão do magma básico durante o Mesozóico com formação dos maciços alcalinos.

4.3 Geologia Local

As principais litologias que compõem a mina Osamu Utsumi consistem em uma suíte de corpos intrusivos rasos de nefelina sienitos e fonólitos cortados por diques de fonólitos e corpos tabulares de brechas vulcânicas (Figura 5). As rochas foram submetidas a processos de alteração hidrotermal e metassomatismo com formação de alterações potássicas e mineralizações de urânio.

Figura 5 Mapa geológico da Mina Osamu Utsumi



Fonte: Capovilla (2001)

As mineralizações de urânio estão associadas aos processos hidrotermais (minério primário) e intempéricos (minério secundário). As brechas são mais enriquecidas em urânio, com altas concentrações em sua matriz, quando comparadas aos sienitos e fonólitos, que apresentam

teores mais baixos (CAPOVILLA, 2001). O magmatismo alcalino nefelínico principal teria persistido regionalmente por mais de 10 Ma e culminou com hidrotermalismo e mineralização de urânio (SHEA, 1992). As brechas são o produto de explosões magmáticas tardias ao evento hidrotermal.

O evento magmático final é responsável pela intrusão de um enxame de diques de biotita lamprófiros ultramáficos ultrapotássicos, que cortam todas as litologias locais e se distinguem pela ausência de feições de hidrotermalismo (GARDA, 1990). Os diques foram datados pelo método Ar-Ar por meio do qual foram obtidas idades de 76 Ma (SHEA, 1992).

O fato das rochas alcalinas estarem próximas à superfície favoreceu a infiltração e percolação de água no maciço, o que contribuiu para a formação das chamadas frentes redox e as mineralizações secundárias de urânio. São definidos dois tipos genéticos de frentes redox, uma estruturalmente controlada pelo sistema de falhas e fraturas que penetram grandes profundidades até alcançarem as zonas de hidrotermalitos com formação de rochas oxidadas, e a outra consiste em frentes redox litologicamente controladas e dependem basicamente da porosidade e permeabilidade da rocha, com avanço dos fluxos intempéricos de cima para baixo (CAPOVILLA, 2001).

4.4 Metalogênese

O enriquecimento de urânio no Maciço Alcalino de Poços de Caldas está relacionado a eventos hidrotermais, responsáveis pela mineralização primária, e aos processos intempéricos posteriores, referentes a mineralização secundária. O depósito de urânio apresenta um teor médio de aproximadamente 0,1%, considerado um depósito de baixo teor, sob a forma de U^{+4} e U^{+6} associado à pirita, fluorita e minerais de zircônio e molibdênio.

Com a evolução do maciço alcalino na fase tectono-magmática, as rochas foram submetidas a elevadas pressões que fizeram com que a parte fluida do magma migrasse e causasse uma argilização nas rochas sobrejacentes, evidenciada pela formação de caolinita, halloysita e sericita. A fluorita e a pirita foram depositadas em pequenos veios, enquanto o urânio foi depositado nos poros das rochas na forma de uraninita e pechblenda com padrão disseminado, muitas vezes associado a brechas mineralizadas. A alteração hidrotermal atuante na região é

acompanhada de brechamento desenvolvido em áreas de rochas aparentemente muito fraturas onde são encontradas as principais mineralizações do maciço alcalino.

Após a formação do complexo alcalino, fluidos hidrotermais fizeram com que a área, onde hoje está localizada a cava da mina fosse enriquecida em urânio, elementos terras raras, potássio e zinco (NORDSTROM *et al.*, 1992). As alterações hidrotermais afetaram as rochas do maciço alcalino como um todo, o que conferiu uma coloração bege esbranquiçada característica dos solos da região (GARDA, 1990). A autora também afirma que as principais mineralizações associadas ao processo de alteração hidrotermal são de zircônio, tório, urânio, molibdênio e elementos terras raras, encontrados junto às rochas caldasito, que consiste em uma mistura entre zircão e baddeleyita em proporções variadas.

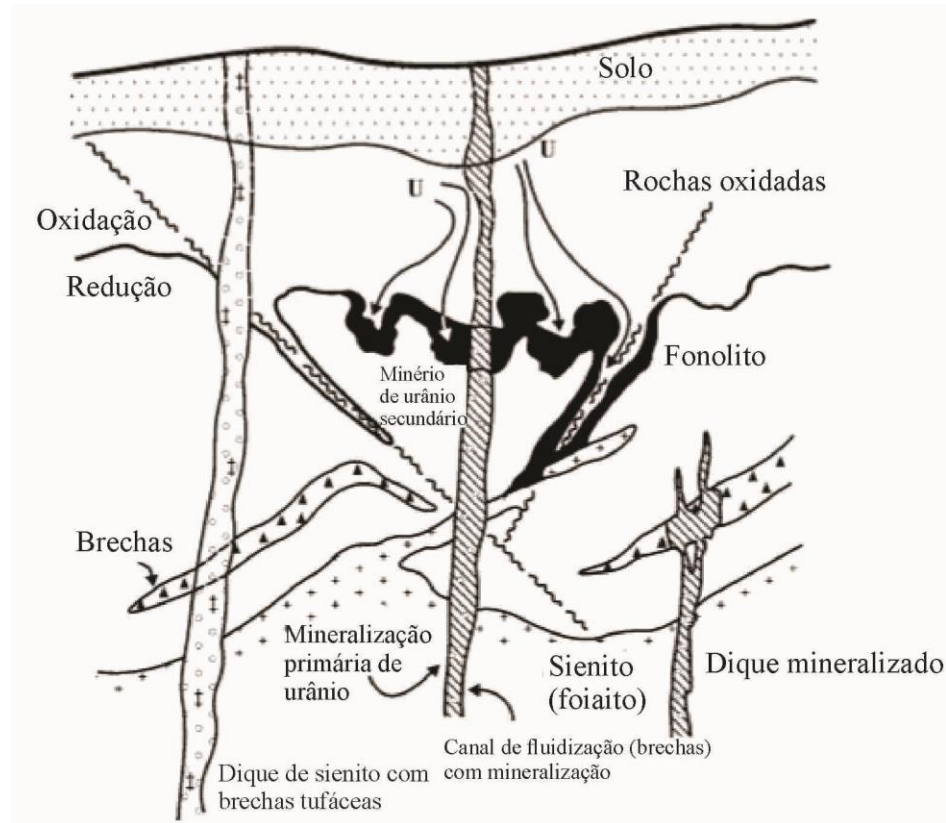
A região foi posteriormente soerguida e exposta a processos intempéricos que perduraram 75 milhões de anos. Os intensos processos de alteração intempérica levaram a formação de expressivos depósitos de bauxita, quase sempre inseridos em uma matriz argilosa e compostos por gibbsita e caolinita, além de depósitos secundários de urânio. As mineralizações secundárias de urânio são produto de processos de alteração supérgena, durante a qual o urânio primário foi oxidado e transportado por águas superficiais, cuja porosidade das rochas e as zonas de intenso fraturamento formaram um ambiente favorável à sua percolação (FRAENKEL *et al.*, 1985; WABER *et al.*, 1992; CAPOVILLA, 2001).

A formação de urânio secundário é consequência do avanço gradativo da frente redox com teores relativamente mais baixos em relação a zonas redutoras onde o urânio é depositado (GARDA, 1990). Ao longo da frente redox, o urânio é precipitado sob a forma de UO_2 e UO_3 e seus produtos de oxidação, como pechblenda nodular e uraninita. A frente redox destaca-se pela sua coloração bege esbranquiçada em contraste com a tonalidade cinza-esverdeada das rochas de ambiente mais redutor.

A infiltração de águas oxidantes fez com que o urânio presente na rocha fosse lixiviado para zonas mais profundas ao longo das fraturas dos maciços. Quando esse fluido alcançou um ambiente mais profundo e redutor, devido à interação com a rocha encaixante ou pelo encontro com fluidos subterrâneos, o urânio foi novamente precipitado, o que configura um depósito disseminado ou na forma de nódulos de pechblenda (MIEKELY *et al.*, 1992). Esse cenário ocorre devido ao comportamento químico do urânio, uma vez que este é solúvel em condições oxidantes

e quimicamente imóvel em condições redutoras. A figura 6 ilustra o modelo genético da mineralização de urânio dentro do contexto do Maciço de Alcalino de Poços de Caldas.

Figura 6 Modelo genético da mineralização de urânio no Complexo Alcalino de Poços de Caldas



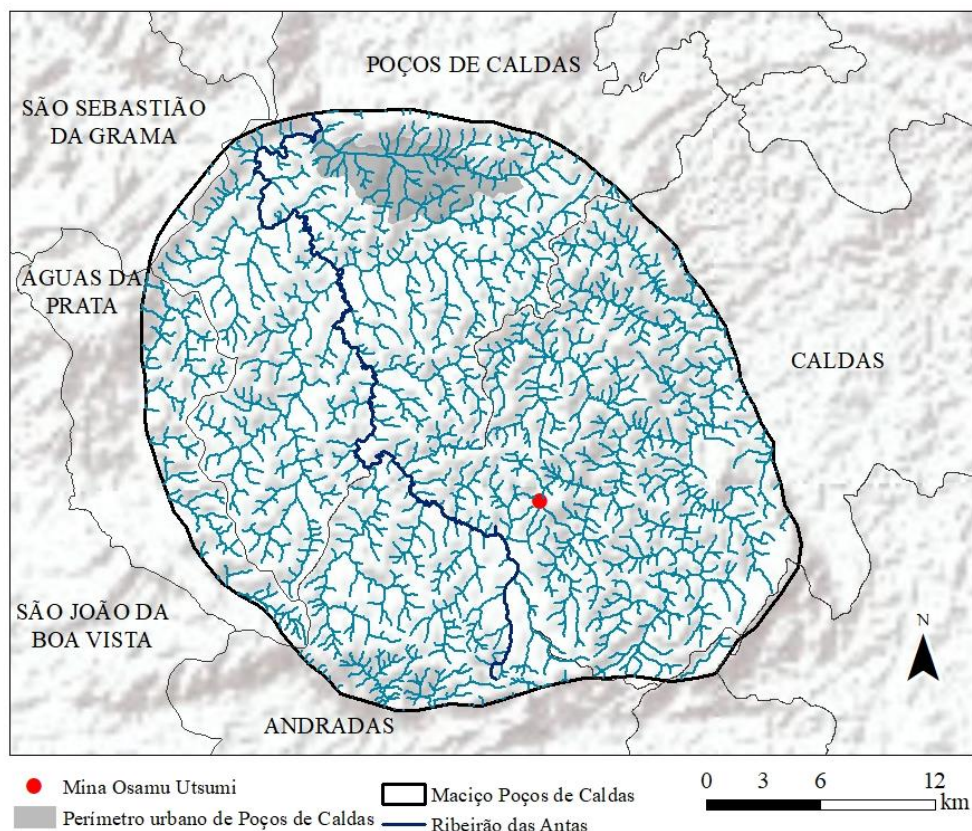
Fonte: Forman e Waring (1981)

4.5 Hidrologia

Os rios da região pertencem ao sistema de afluentes da margem esquerda do Rio Pardo, tributário do Rio Grande. Seus cursos d'água são constituídos e alimentados apenas pelas precipitações pluviométricas, formado por dois sistemas de drenagens: o do Rio das Antas e o do Rio Verde (Figura 7). O primeiro drena 75% do Planalto, represado antes de atravessar o município de Poços de Caldas e antes de precipitar-se encosta abaixo ao noroeste. A mina Osamu Utsumi está situada no divisor de águas entre os dois sistemas de drenagem (FRAENKEL *et al.*, 1985). A configuração da rede de drenagem é influenciada pelas estruturas e litotipos presentes nos maciços, muitas vezes manifestada por estruturas circulares e radiais (GARDA, 1990).

A área de estudo é caracterizada por aquíferos fraturados, onde a capacidade de armazenamento e circulação significativa de água se restringe a zonas do manto de alteração e ao sistema de fraturas das rochas subjacentes (FRANKLIN, 2007). A mina Osamu Utsumi apresenta drenagens efêmeras em vales íngremes e encaixados. Os fluxos subterrâneos são reabastecidos nas áreas de interflúvio e topograficamente mais elevadas, onde predomina um ambiente mais oxidante, enquanto a área de descarga consiste nas áreas de vale.

Figura 7 Sistema de drenagens do Planalto de Poços de Caldas



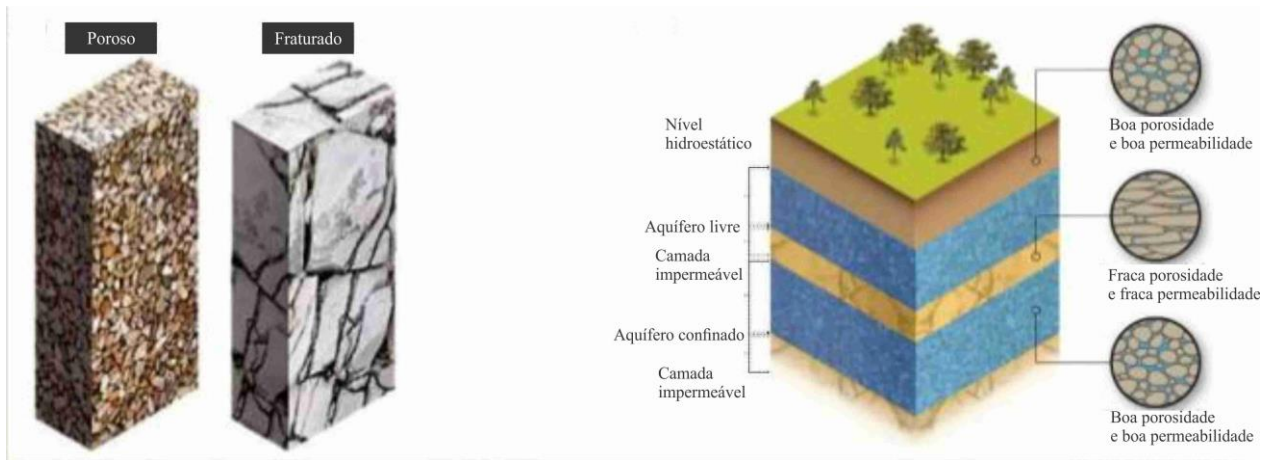
Fonte: Autoria própria

4.6 Hidrogeologia

Devido a esforços regionais atuantes no Maciço Alcalino de Poços de Caldas, a região apresenta um sistema de falhas e fraturas profundas e abertas que permite a percolação e infiltração de água no maciço rochoso. Essas zonas de discontinuidades de caráter rúptil configuram um meio de porosidade secundária que permite que as águas subterrâneas fluem por

fraturamento (Figura 8). A presença de um manto de alteração proveniente da alteração das rochas basais propicia a circulação de águas subterrâneas em meio poroso em porções mais rasas do perfil.

Figura 8 Representação dos tipos de aquíferos presentes na área de estudo



A hidrogeologia da região está inserida no contexto de um aquífero cristalino fraturado constituído de três tipos principais de rocha, foiaítos, tinguaítos e fonólitos, que apresentam características químicas e mineralógicas muito semelhantes. Os fluxos de descarga consistem em uma mistura de águas subterrâneas redutoras, que se aproveitam das fraturas dos maciços rochosos como condutos, e águas superficiais oxidantes. As águas superficiais apresentam índices de pH em torno de 3 a 4, mais ácidas quando comparadas aos fluxos subterrâneos com pH entre 5 e 6 (MIEKELY *et al.*, 1992).

As águas superficiais estão restritas ao manto de alteração das rochas do embasamento, constituído por material arenoso e argiloso em função da composição mineralógica da rocha inalterada, enquanto os fluxos de água subterrâneos fluem em um sistema de aquífero fraturado de modo difuso. O aquífero fraturado é dividido em três zonas principais: uma zona aquífera rasa, uma zona aquífera intermediária que alcança 200m de profundidade e uma zona aquífera de circulação profunda com cerca de 2000m de profundidade (CRUZ e PEIXOTO, 1989). As diferentes profundidades em que essas zonas ocorrem implicam em características físico-químicas distintas, assim como diferentes composições químicas das águas subterrâneas.

As águas provenientes da zona aquífera rasa, localizada a pequenas profundidades, são caracterizadas como bicarbonatadas com baixas concentrações de Cl^- e SO_4^{2-} e teores significativos de K^+ , Na^+ , Ca^{2+} e Rn^{222} . Apresentam um teor de total de sólidos dissolvidos baixo em relação às outras zonas do sistema aquífero, com pH ligeiramente ácido, na ordem de 5,4 e 6,9. As águas circulam em um manto de alteração proveniente do intemperismo das rochas basais. A percolação de água nos maciços rochosos produz uma interação química entre os minerais, principalmente pirita, que retira oxigênio da água e faz com que o ambiente se torne cada vez mais redutor, o que configura uma frente redox (HOLMES *et al.*, 1992).

A zona intermediária, que compreende um intervalo de 150 a 200 m de profundidade, consiste em águas com temperaturas entre 21°C e 26°C e que se diferenciam das águas superficiais pelo incremento de total de sólidos dissolvidos e pelo pH neutro à levemente alcalino, que varia entre 6,2 e 8,4. Semelhante à zona aquífera rasa, as águas são classificadas como bicarbonatadas com teores de álcalis significativos em relação aos outros íons presentes na solução.

A zona aquífera de circulação profunda é caracterizada por águas hipertermiais, alcalinas, bicarbonatadas sódicas e sulfurosas. Apresentam temperaturas da ordem de 40°C, um aumento acentuado no total de sólidos dissolvidos e pH alcalino, entre 9,6 e 9,8, acompanhado de maiores concentrações de carbonatos, sódio, sulfetos e fluoretos. O incremento na temperatura intensifica o processo de dissolução da rocha e do material das paredes das fraturas, o que favorece a disseminação de minerais enriquecidos em F^- e S^- (Cruz e Peixoto (1989). A concentração de sulfato é muito baixa nas zonas mais profundas devido à ausência de oxigênio que impede a oxidação de sulfetos.

As interferências na conformação da topografia original da área onde está inserida a Mina Osamu Utsumi fizeram com que o nível freático fosse rebaixado e o padrão de fluxos subterrâneos fossem fortemente alterados. Uma das consequências da alteração do padrão de fluxo subterrâneo foi a modificação da circulação das águas oxidantes e redutores, que força águas redutoras a migrarem para zonas superficiais e propicia a oxidação de íons como sulfeto. As áreas de captação da mina são mais largas em relação ao vale fluvial original, que captam um volume de água que originalmente era desviado para outros vales fluviais. Para manter o funcionamento das atividades da mina, é necessário que cerca de 50 m³ (estações secas) a 100 m³ (estações úmidas) de água por hora sejam bombeadas da cava da mina para manter o nível

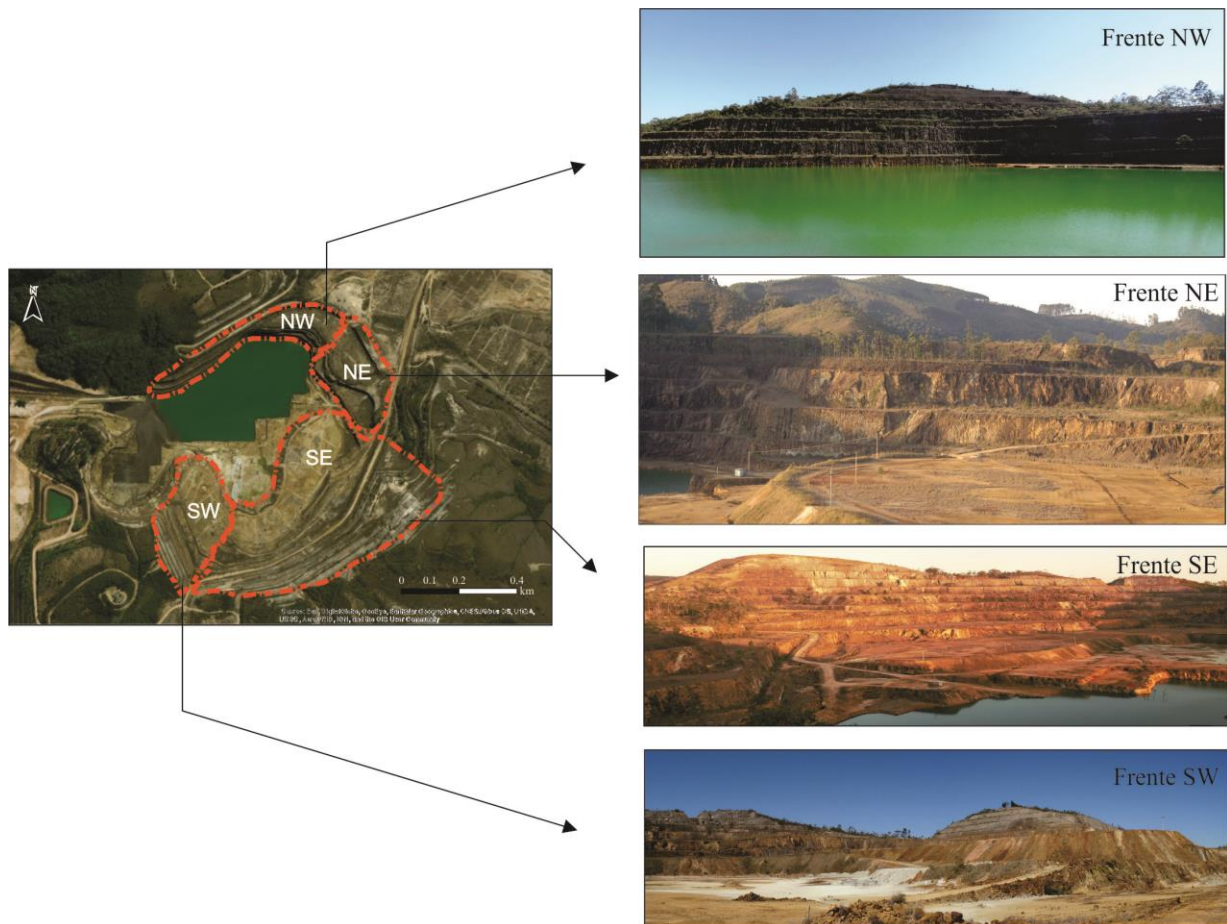
freático estável e o pavimento seco (HOLMES *et al.*, 1992). Sem o sistema de bombeamento, a cava da mina seria rapidamente preenchida por água devido à sua geometria em forma de bacia.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo corresponde a cava da Mina Osamu Utsumi, inserida no contexto do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, com dimensões aproximadas de 1200 m no eixo maior e 800 m no eixo menor. Foram realizadas análises estruturais de quatro frentes (figura 9) de lavra a partir do levantamento de planos de fraturas com o intuito de obter um diagnóstico hidrogeológico-geotécnico da cava da mina.

O trabalho foi desenvolvido em quatro etapas, as quais consistem no levantamento bibliográfico, levantamento de dados estruturais de planos de fraturas das quatro frentes de lavra, diagnóstico hidrogeológico-geotécnico e a integração e discussão dos resultados obtidos na forma de uma monografia. A seguir são detalhados os procedimentos adotados para a elaboração do presente trabalho.

Figura 9 Cava da Mina Osamu Utsumi e as quatro frentes de lavra onde foram feitos os levantamentos estruturais



Fonte: Autoria própria

5.1 Levantamento bibliográfico

A fundamentação teórica consiste na compilação de dados e conceitos fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho. Foram feitos levantamentos bibliográficos a partir de base de dados nacionais e internacionais, com consultas em portais de periódicos online, acervo geral de teses e dissertações, Plataforma Geobank disponibilizada pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil), materiais e dados fornecidos pelo ANA (Agência Nacional de Águas) e definição dos principais conceitos que envolvem as características hidrogeológicas de aquíferos fraturados, movimentos de massa em taludes de mineração e relevância da análise estrutural em mineração para o diagnóstico hidrogeológico-geotécnico.

5.2 Levantamento de dados estruturais

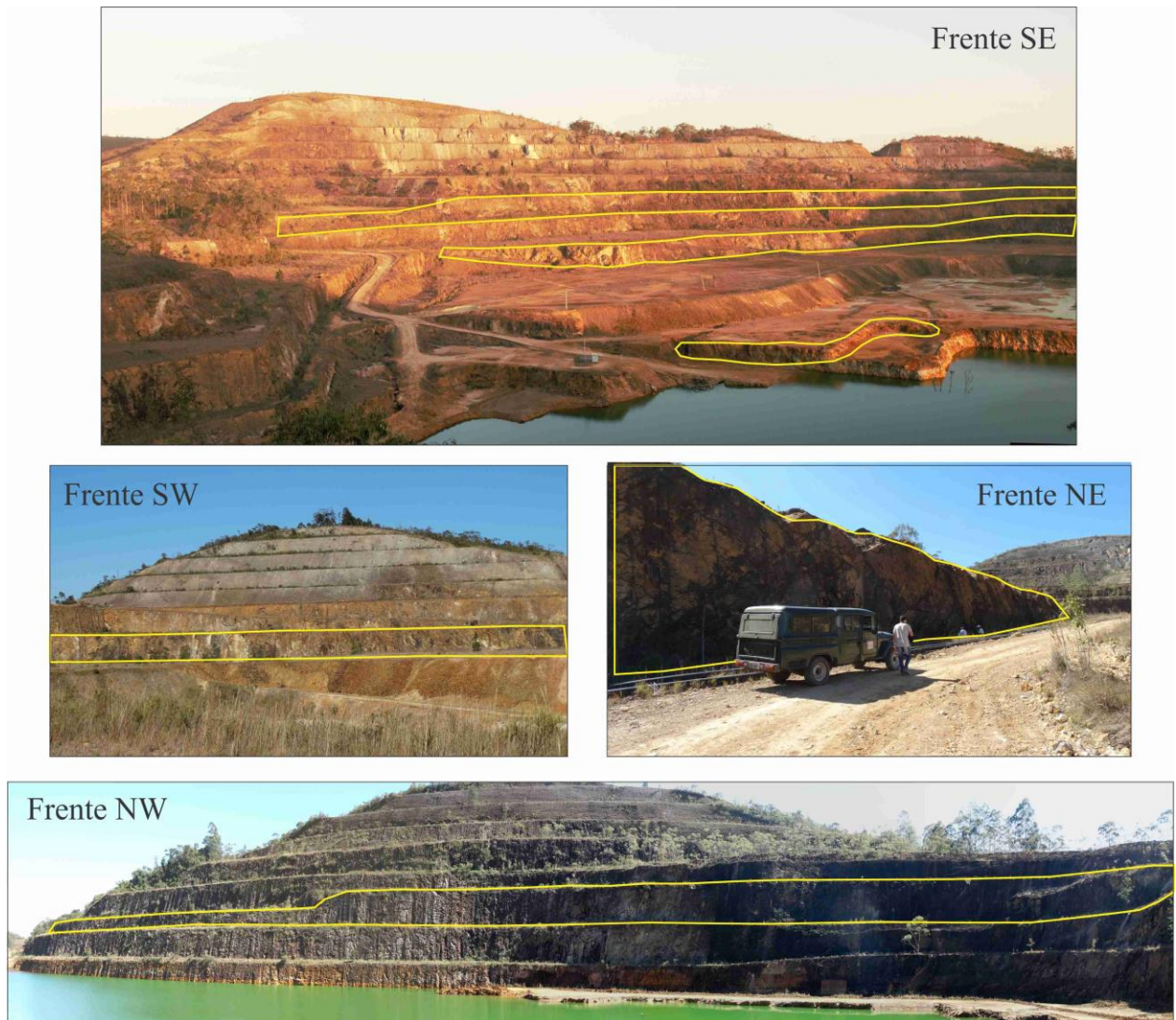
O levantamento de dados estruturais foi elaborado em duas etapas. A primeira se refere à extração de feições estruturais de escala regional no Maciço Alcalino de Poços de Caldas a partir de imagens aéreas do Google Earth Pro e digitalizadas pelo *software* ArcGis 10.3. Esse produto permitiu a identificação do trend de falhamentos regionais e sua possível correlação com as estruturas locais encontradas nas frentes de lavra da Mina Osamu Utsumi.

A segunda etapa de aquisição de dados estruturais consistiu no levantamento dos planos de fraturas nos taludes de rocha das quatro frentes de lavras da Mina Osamu Utsumi (frentes NE, SE, SW e NW). Foram feitas medições com bússola Brunton e notação Clar (direção de mergulho/ mergulho), cuja declinação magnética local é de 21° 37'.

Um total de 755 medidas foram levantadas das quatro frentes e registrada a presença e/ou indícios de fluxos de água nas discontinuidades dos maciços rochosos. Posteriormente, apenas os planos de fraturas com evidências de fluxo d'água foram levantados, o que permitiu definir as famílias de fraturas que canalizam e favorecem a entrada de água na cava da mina.

Na frente SE, foram feitas 255 medidas de planos de fraturas em 3 níveis de bancadas, uma próxima ao corpo d'água da cava (bancada inferior), uma bancada intermediária e outra no nível da estrada de acesso à mina (bancada superior) (Figura 10). As bancadas superiores não foram acessadas devido às condições precárias e instabilidade dos taludes. Nas frentes NE, SW e NW foram feitas 150 em cada uma delas, nas bancadas próximas ao lago da cava.

Figura 10 Disposição das bancadas onde foram levantados os dados estruturais das frentes de lavra



Fonte: Autoria própria

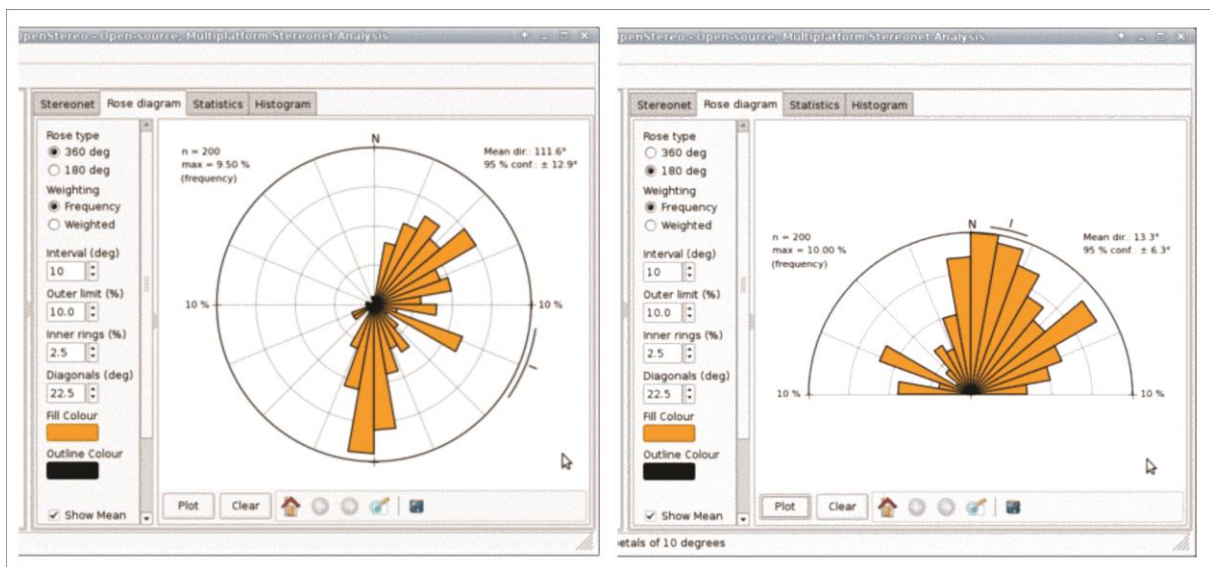
5.3 Análise estrutural

Os dados estruturais foram organizados em arquivos no formato txt a fim de compor os estereogramas e diagramas de rosetas gerados pelo *software* Openstereo. A plotagem dos polos dos planos no formato *dipdir/dip* (direção de mergulho/ mergulho) e os contornos de densidade permitiram uma melhor visualização das direções preferenciais das fraturas em cada frente de lavra.

Os estereogramas e diagramas de rosetas consistem em um tratamento estatístico de medidas estruturais que permite uma série de análises e interpretações. Os diagramas de rosetas são representações das direções e frequências das medidas de fraturas coletadas na área de estudo (figura 11). Estas podem ser representadas como um círculo completo (360°) ou como metade de um círculo (180°), neste último caso todas as medidas de direção precisam ser recalculadas de forma a ficarem no primeiro e quarto quadrante (figura 11). No presente estudo, foram usadas as rosetas de círculo completo em função de facilitar a visualização da distribuição das frequências dos planos de mergulho.

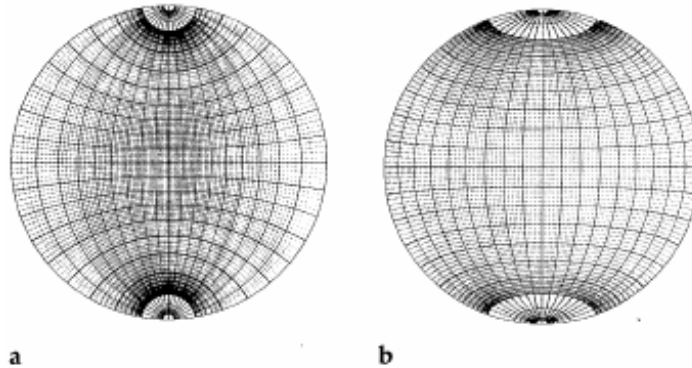
A projeção estereográfica consiste na representação espacial de planos e lineamentos que possibilita o entendimento de suas relações geométricas, amplamente aplicada no campo da geologia estrutural (CARNEIRO, 1996). Existem dois tipos de rede de projeção, a de Schmidt (de igual área) e a rede de Wulff (de igual ângulo) (figura 12). A primeira é mais apropriada para a representação de feições lineares e planares, cujo interesse reside na distribuição dos elementos na área do diagrama, além de ser a mais usual entre os estruturalistas. Já a segunda é mais utilizada para análise das relações angulares entre os elementos. Por essa razão, a rede de Schmidt foi escolhida para a projeção dos planos de fraturas do presente trabalho.

Figura 11 Representação de diagramas de roseta como um círculo completo (360°) e meio círculo (180°)



Fonte: Grohmann *et al* (2011)

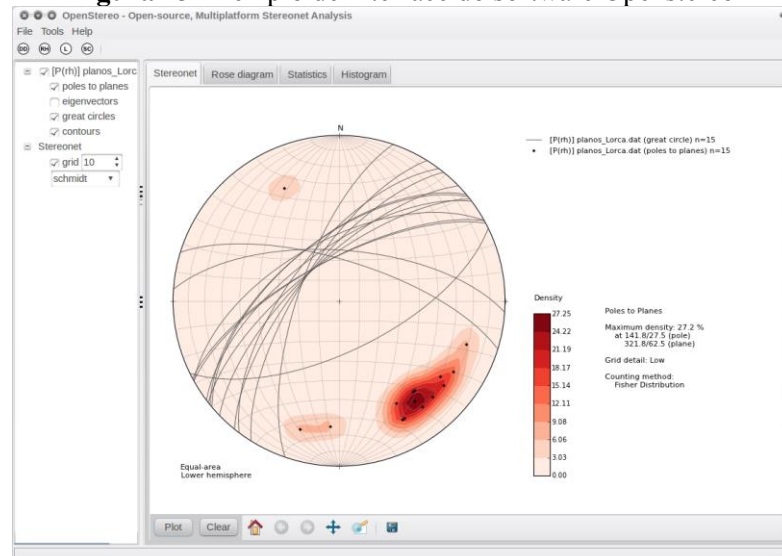
Figura 12 Rede de projeção estereográfica de Wulff (a) e de Schmidt (b)



Fonte:

O Openstereo, designado como um *software* livre, é um programa que está em constante renovação para melhorar a sua funcionalidade, cujo intercâmbio entre as ideias dos usuários e desenvolvedores reflete em um sistema estável, com atualizações constantes e orientadas à demanda dos usuários (GROHMANN *et al.*, 2011). Sua interface gráfica é acessível e de simples manuseio, o que permitiu elaborar estereogramas e rosetas didáticos e de fácil compreensão (Figura 13). Assim, os produtos obtidos por esse *software* contribuíram para as análises estruturais das frentes de lavra e para a definição das características hidrológicas e geotécnicas da Mina Osamu Utsumi.

Figura 13 Exemplo de interface do software Openstereo

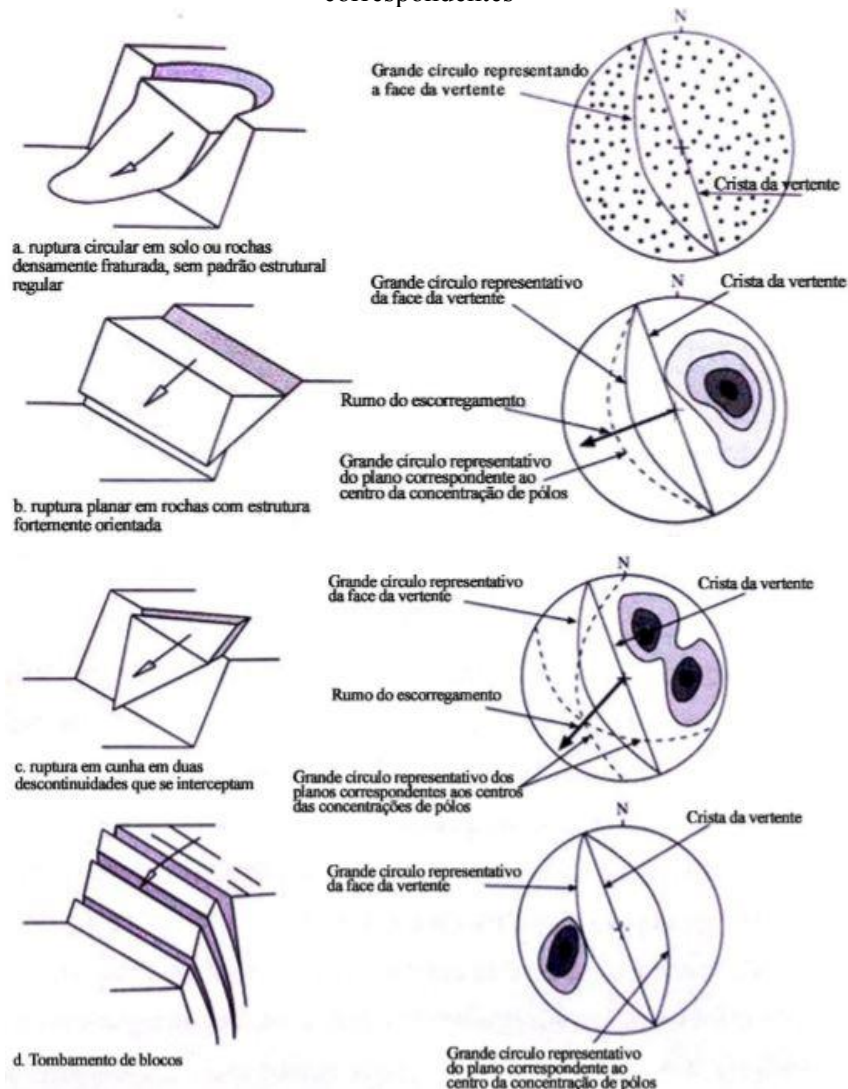


Fonte: Alvarez-Gomes (2011)

5.4 Análise geotécnica

A análise geotécnica foi baseada no levantamento estrutural das famílias de fraturas e observações em campo de instabilidades geotécnicas. Os dados estruturais obtidos pelos estereogramas foram comparados aos padrões de escorregamentos, conforme Hoek e Bray (1981) (Figura 14), o qual permitiu a caracterização dos processos de dinâmica de encosta e o direcionamento de sistemas de remediação mais adequados à área de estudo. Assim, o estudo contribui para a manutenção e estabilidade dos taludes da Mina Osamu Utsumi e, conseqüentemente, garante a segurança dos funcionários e a dinâmica do empreendimento.

Figura 14 Principais tipos de escorregamentos em vertentes e suas representações estereográficas correspondentes



Fonte: Hoek e Bray (1981)

5.5 Integração dos resultados e elaboração da monografia

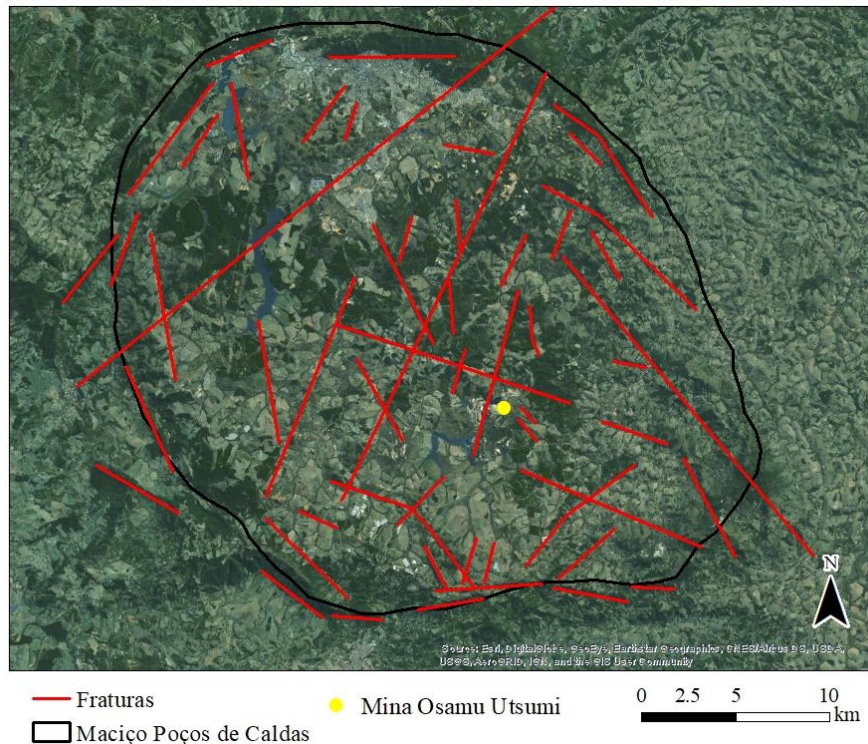
A integração entre o levantamento de dados estruturais de planos de fratura e observações de campo serviu de base para que fosse feito um diagnóstico hidrogeológico-geotécnico da Mina Osamu Utsumi. Foram definidas as relações entre as medidas dos planos de fraturas em cada frente de lavra e sua contribuição para o aporte de água na cava da mina. Ademais, a ocorrência de escorregamentos e quedas de blocos foi correlacionada ao padrão de fraturamento dos taludes de mineração, com propostas soluções geotécnicas mitigadoras para ocorrência desses fenômenos. Os dados e discussões desenvolvidos ao longo do trabalho foram compilados e organizados na forma de uma monografia conforme as normas ABNT 14724:2011 para trabalhos acadêmicos.

6 RESULTADOS

6.1 Estruturas regionais

As fraturas de escala regional apresentam duas direções predominantes, uma NE-SW e outra NW-SE (Figura 15). Nas bordas da intrusão alcalina, as fraturas tendem a acompanhar o perímetro circular do maciço de Poços de Caldas. Essa configuração é uma das evidências das fendas circulares e radiais que permitiram a ascensão do magma nefelínico e formação do grande dique anelar, quase completo, apenas não reconhecido na porção SE (ELLERT, 1959).

Figura 15 Fraturas regionais extraídas do Maciço Alcalino de Poços de Caldas



Fonte: Autoria própria

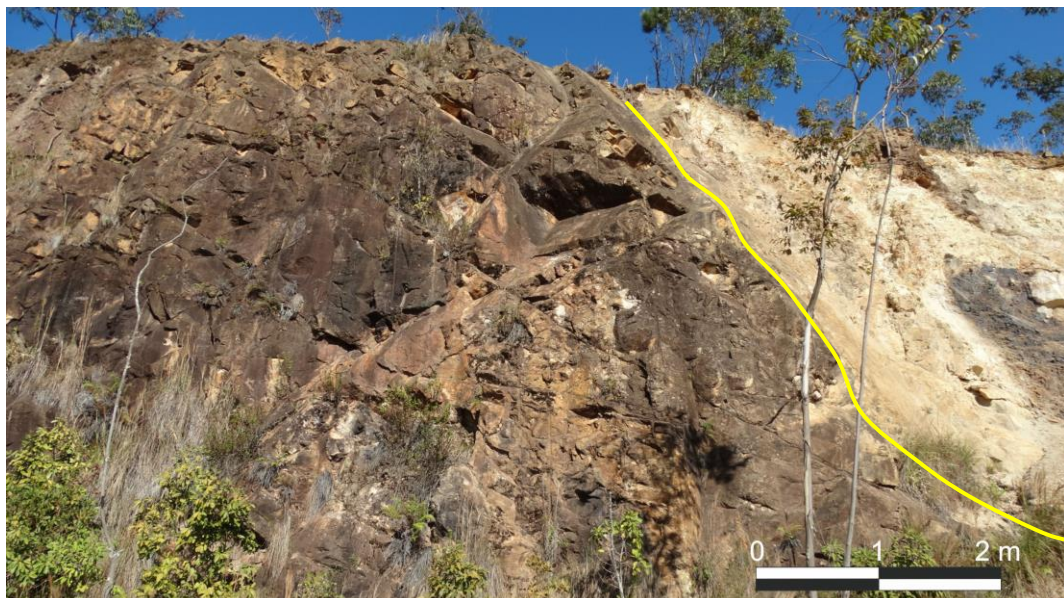
Na porção noroeste do Maciço Alcalino, próximo ao município de Poços de Caldas, a direção predominante é NE-SW. A porção sudeste é caracterizada pelo cruzamento de duas famílias principais de fraturamento, com direção NE e NW, praticamente ortogonais entre si, cujo mesmo padrão é observado próximo à área da Mina Osamu Utsumi.

Outra feição que destaca os fraturamentos regionais é o padrão de drenagem do Ribeirão das Antas e seus afluentes. O rio nasce próximo a borda sudeste do maciço e segue para a direção noroeste, com seu curso em ângulos quase retos ora para NE e ora para NW, atravessando todo o complexo.

6.2 Caracterização das frentes de lavra da Mina Osamu Utsumi

As frentes de lavra da Mina Osamu Utsumi foram construídas a partir de um sistema de bancadas, cuja bancada apresenta uma largura de 7 m e taludes de rocha com 70° de inclinação e 12 m de comprimento. Os taludes são essencialmente constituídos por rochas, no caso fonólitos e minoritariamente nefelina sienitos, os quais são cortados por três famílias de fraturas. O fonólito são corresponde a uma rocha de coloração cinza escuro, enquanto suas porções intemperizadas possuem um aspecto esbranquiçado a manchado com formação de finas camadas de solo (Figura 16). As porções de solo são de composição argilosa e apresentam uma coloração bege esbranquiçada típica da alteração dos fonólitos. Foram observadas manchas escuras referentes à formação de óxido de manganês (Figura 17).

Figura 16 Contraste entre a rocha fonólito e a formação de solo esbranquiçado originado pela sua alteração



Fonte: Autoria própria

Em todas as frentes de lavra foram observadas presença ou indícios de fluxos de água, representados por manchas esbranquiçadas de caolinita e crescimento de vegetação por onde houve percolação de água. Em algumas frentes de lavra, o fluxo de água é contínuo e forma pequenos canais que escoam em direção à cava da mina. Em relação aos processos de dinâmica de encosta, foram observadas feições de escorregamento planar e escorregamento em cunha, além de queda de blocos e matacões acumulados na base do talude.

Figura 17 Formação de óxido de manganês caracterizado por alterações de coloração escura



Fonte: Autoria própria

O levantamento estrutural dos planos de fratura da Mina Osamu Utsumi indicou que as direções preferenciais das discontinuidades seguem o padrão regional. As fraturas apresentam direção principal para NE-SW, e caimento para NW, e subordinadamente para NW-SE e W-E, com ângulos de mergulho acima de 45° (Figuras 18 e 19). Em todas as frentes de lavra é possível observar um padrão de intersecção das principais famílias de fratura, com formação de blocos de rocha na forma de losangos.

Figura 18 Estereograma com 755 medidas estruturais e as direções preferencias das famílias de fraturas

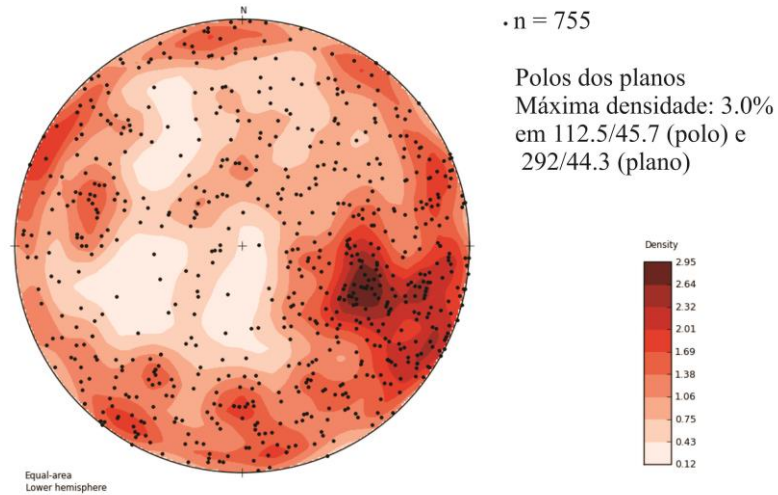
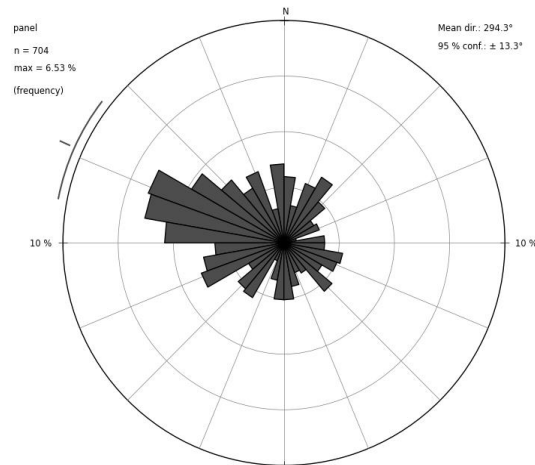


Figura 19 Distribuição das frequências de direção de mergulho dos planos de fratura



6.2.1 Frente de lavra SE

O talude da frente SE apresenta direção NE-SW com mergulho superior a 80° para NW. A maior frequência de polos indica que os planos de fraturas são paralelos ao talude com mesma direção de mergulho para NW (Figuras 20 e 21). Os ângulos de mergulho mais recorrentes apresentam valores próximo a 50° . Essa configuração estrutural favorece a ocorrência de movimentos de bloco em direção aos patamares das bancadas, o que pode comprometer a estabilidade dos taludes e da própria frente de lavra. O fato dos planos das discontinuidades

mergulharem a favor do talude mostra que os fluxos de água que percolam os maciços rochosos são canalizados em direção à cava da mina.

Figura 20 Estereograma dos planos de fratura da frente SE

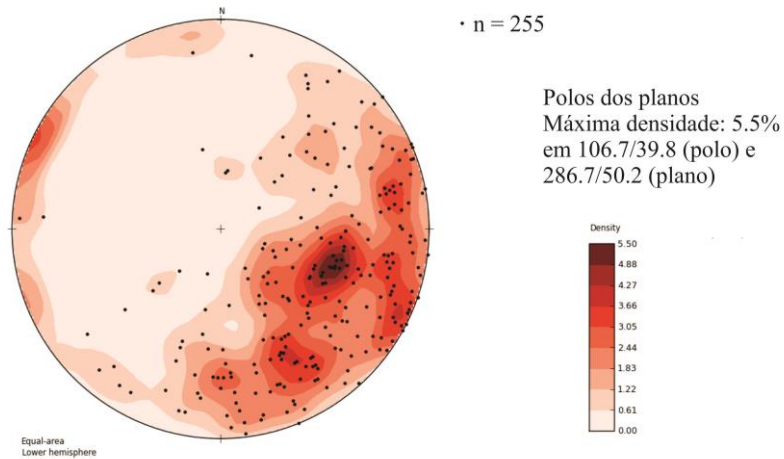
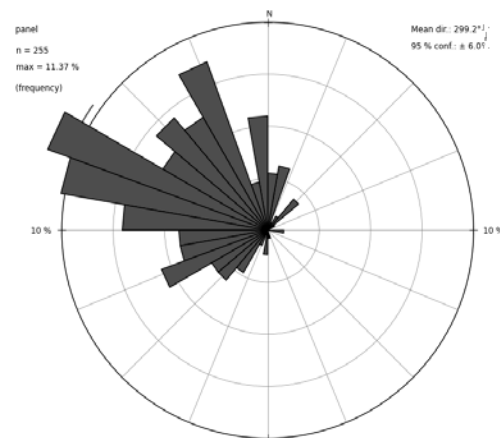


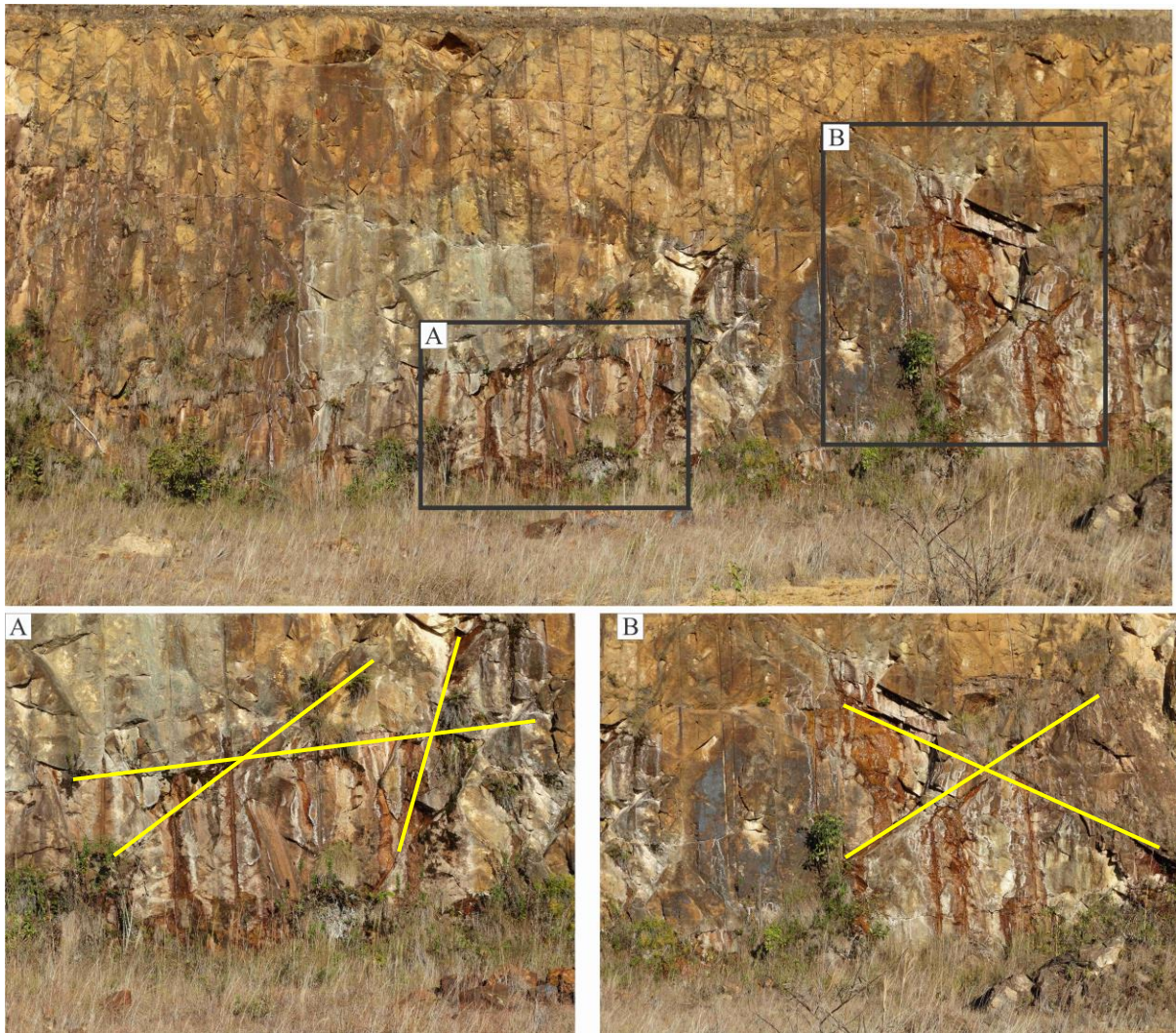
Figura 21 Distribuição das frequências das direções de mergulho da frente SE



A presença de fluxos de água é muito marcante nessa frente de lavra, onde é possível observar um escoamento de água contínuo pelas fraturas dos maciços rochosos e manchas esbranquiçadas que marcam antigos fluxos (Figura 22). A água flui principalmente da bancada intermediária, onde é observado o crescimento de musgos e plantas de pequeno porte, e segue em direção à cava da mina. Já nas bancadas superior e inferior, há o predomínio de manchas esbranquiçadas de caolinita sem surgência ativa de água em função do campo ter sido realizado na estação seca.

A frente SE, devido à sua posição geográfica, recebe incidência de luz solar grande parte do dia, o que contribuiria para a redução do volume de água nos maciços rochosos. Contudo, foi constatada a formação de pequenos canais que continuamente escoam água dos maciços e contribuem para o aumento do volume de água que chega até a cava da mina, o qual é bombeado para as estações de tratamento. Os fluxos de água afloram principalmente em zonas onde há o cruzamento de duas famílias de fraturas praticamente ortogonais entre si.

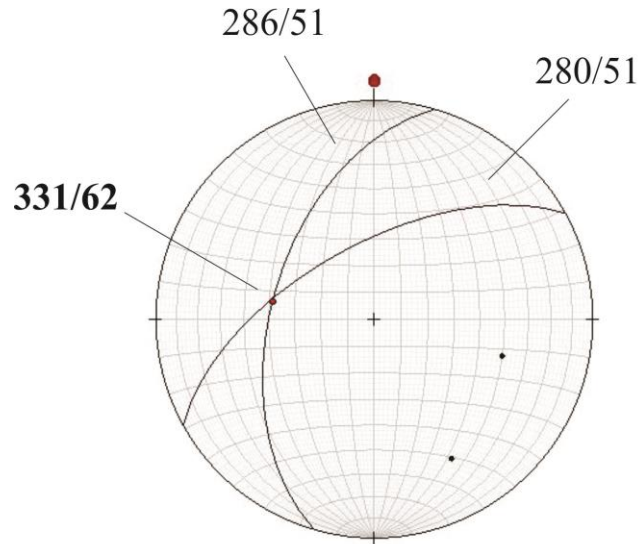
Figura 22 Indícios de percolação de água representados por manchas esbranquiçadas nos maciços fraturados (linhas amarelas) e surgência de água nos taludes na frente de lavra SE



Em relação aos problemas geotécnicos nos taludes da frente SE, foram identificados dois processos principais de dinâmica de encosta, escorregamento planar e em cunha e queda de blocos e matacões. A intersecção das duas principais famílias de fratura revela um lineamento de

intersecção, um dos requisitos para a ocorrência de escorregamentos em cunha. A linha de intersecção apresenta atitude de 331/62 (Figura 23).

Figura 23 Linha de intersecção dos planos de fratura na frente SE



O intenso fraturamento do talude favoreceu a formação de blocos de tamanhos variados, desde blocos com 50 cm a matações com mais de 2 m de comprimento. Os intensos processos intempéricos atuantes na área de estudo comprometeram a integridade do material rochoso e, consequentemente, de suas propriedades físicas, o que o torna mais suscetível aos movimentos de massa.

O material proveniente dos escorregamentos consiste em camadas pouco espessas (menores que 1m) de solo argiloso esbranquiçado com blocos de rocha que são depositados nos patamares das bancadas, lugar onde foram instaladas as vias de acesso da mina (Figura 24). Os escorregamentos planares são os mais recorrentes e são caracterizados por superfícies planas com cerca de 12 m de comprimento (Figura 25). Os escorregamentos em cunha aparecem de forma isolada e são relativamente menores (Figura 26).

Figura 24 Acúmulo de blocos e matacões na base do talude da frente SE

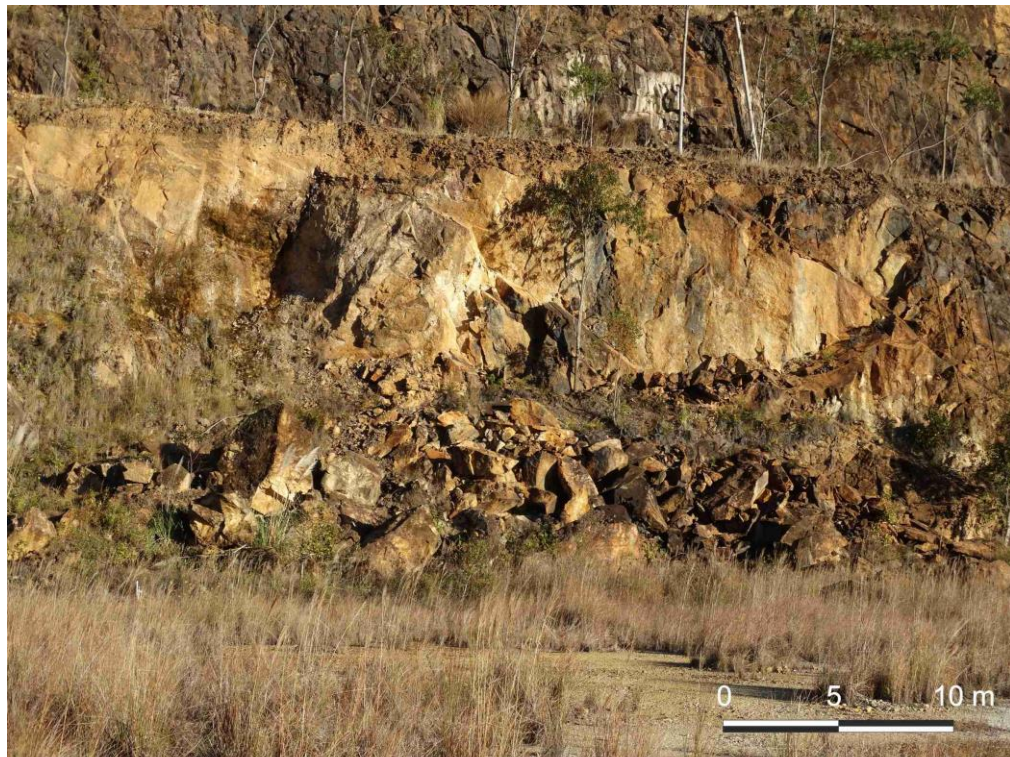


Figura 25 Superfície de escorregamento planar em três bancadas da frente SE

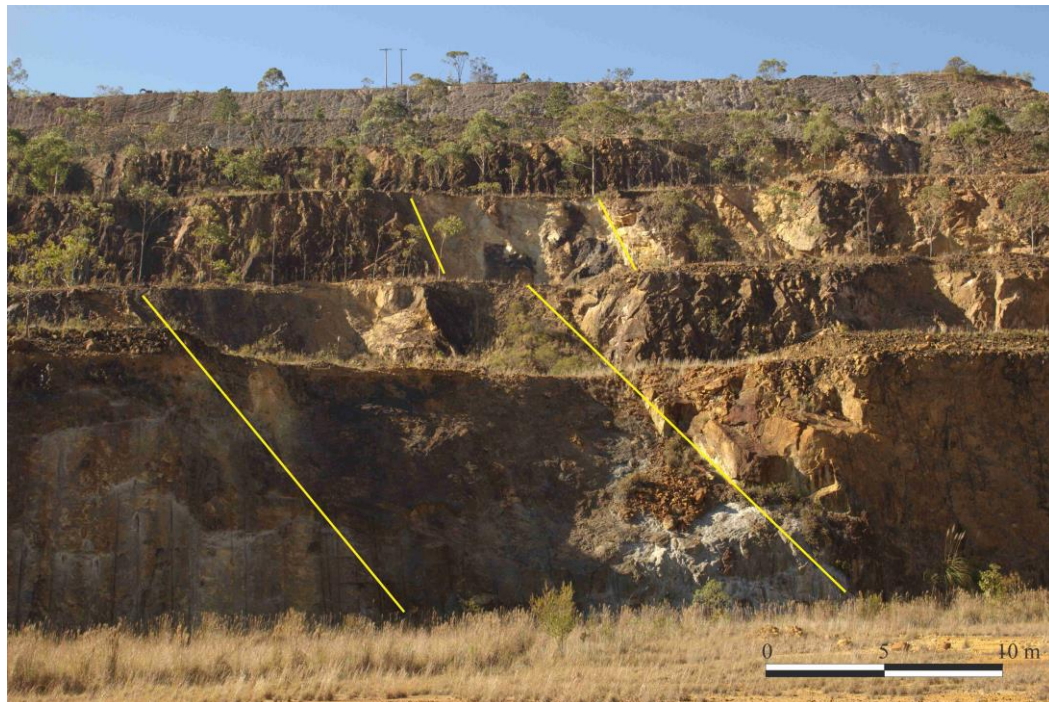
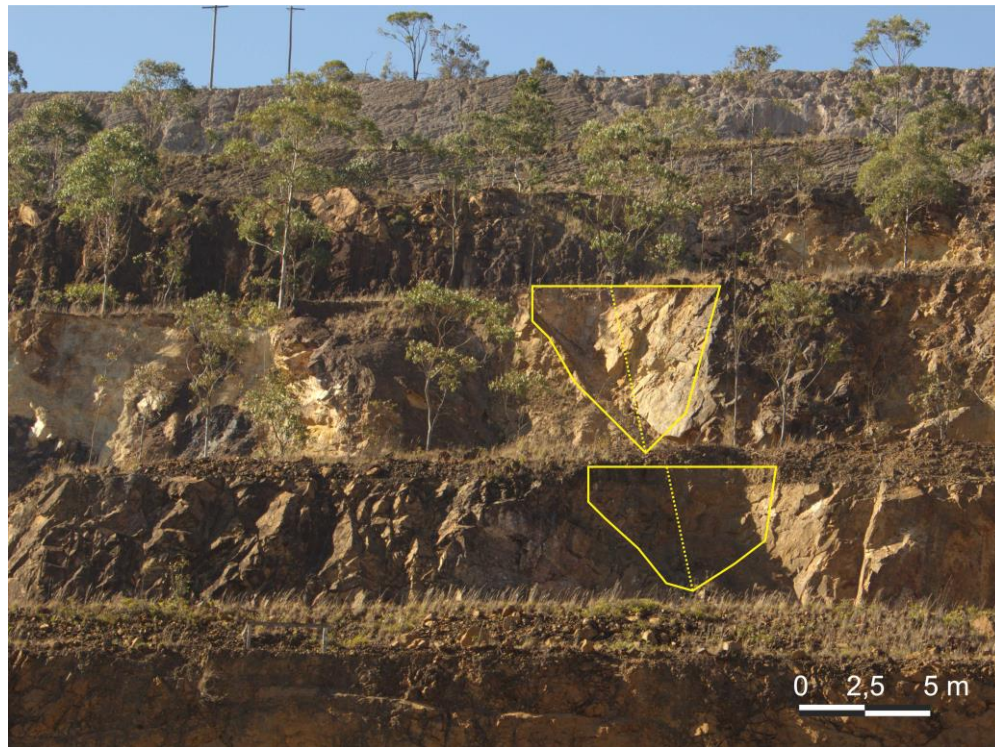


Figura 26 Escorregamentos em cunha identificados na frente SE



6.2.2 Frente de lavra NE

Os taludes da frente NE apresentam direção NW-SE com mergulho para SW. A representação dos polos dos planos de fraturas indicou uma direção preferencial das descontinuidades para N-S com mergulho para W a NW (Figuras 27 e 28). A maior parte dos planos de fraturas possuem ângulos de mergulho próximo a 40°.

Figura 27 Estereograma dos planos de fraturas da frente NE

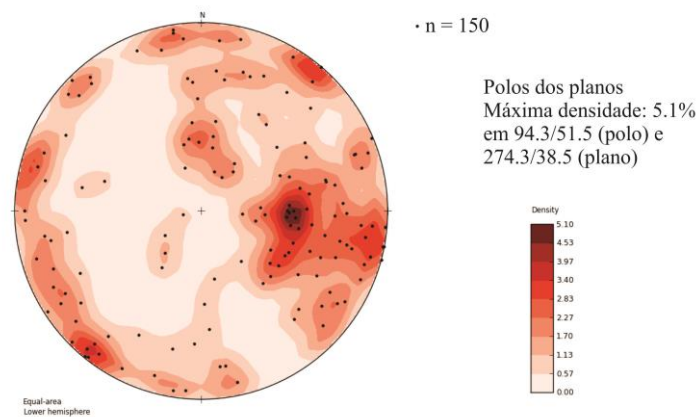
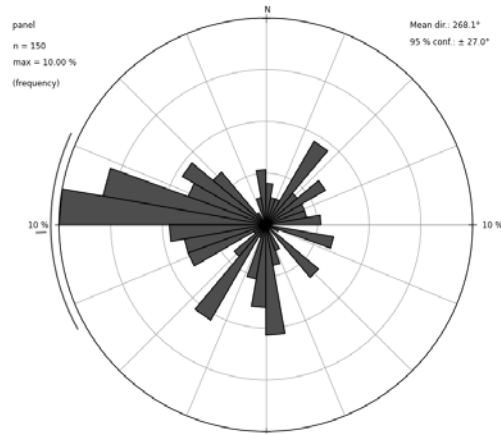


Figura 28 Distribuição das frequências de direção de mergulho das fraturas da frente NE



As características estruturais da frente NE indicam que a direção das descontinuidades não é concordante com a direção do talude, o que configura uma estabilidade maior dos maciços rochosos e, conseqüentemente, de seus taludes. Essa afirmação é comprovada devido à ausência de movimentos de massa ao longo dos taludes. Além disso, esse cenário implica na redução da canalização de fluxos de água para fora do talude e para a cava da mina, o que é corroborado pelos poucos indícios de fluxos de água registrados em comparação com as outras frentes de lavra, inclusive ausência de manchas esbranquiçadas de antigas percolações de água (Figura 29).

Figura 29 Vista geral da frente NE, destaque para a ausência de indícios de fluxo de água



6.2.3 Frente de lavra NW

Os taludes da frente NW apresentam direção NE-SW e mergulham para SE. As principais estruturas são representadas por planos de fraturas com direção preferencial NE-SW e duas direções de mergulho opostos, com maior frequência para SE e outro para NW (Figuras 30 e 31).

Figura 30 Estereograma com os planos de fratura da frente NW

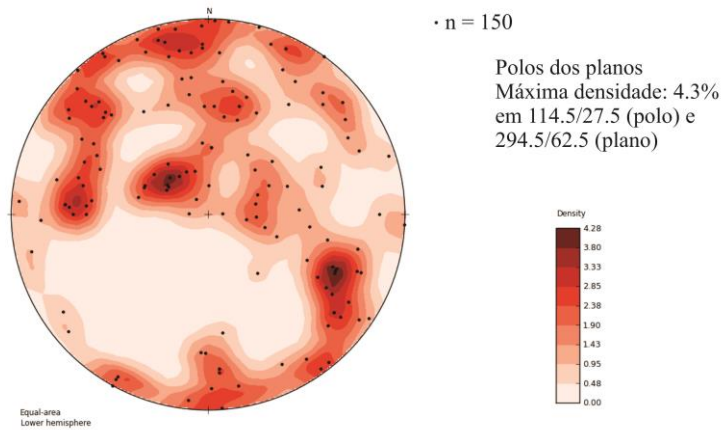
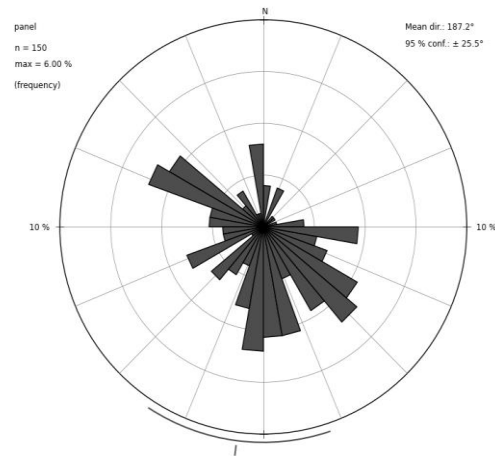


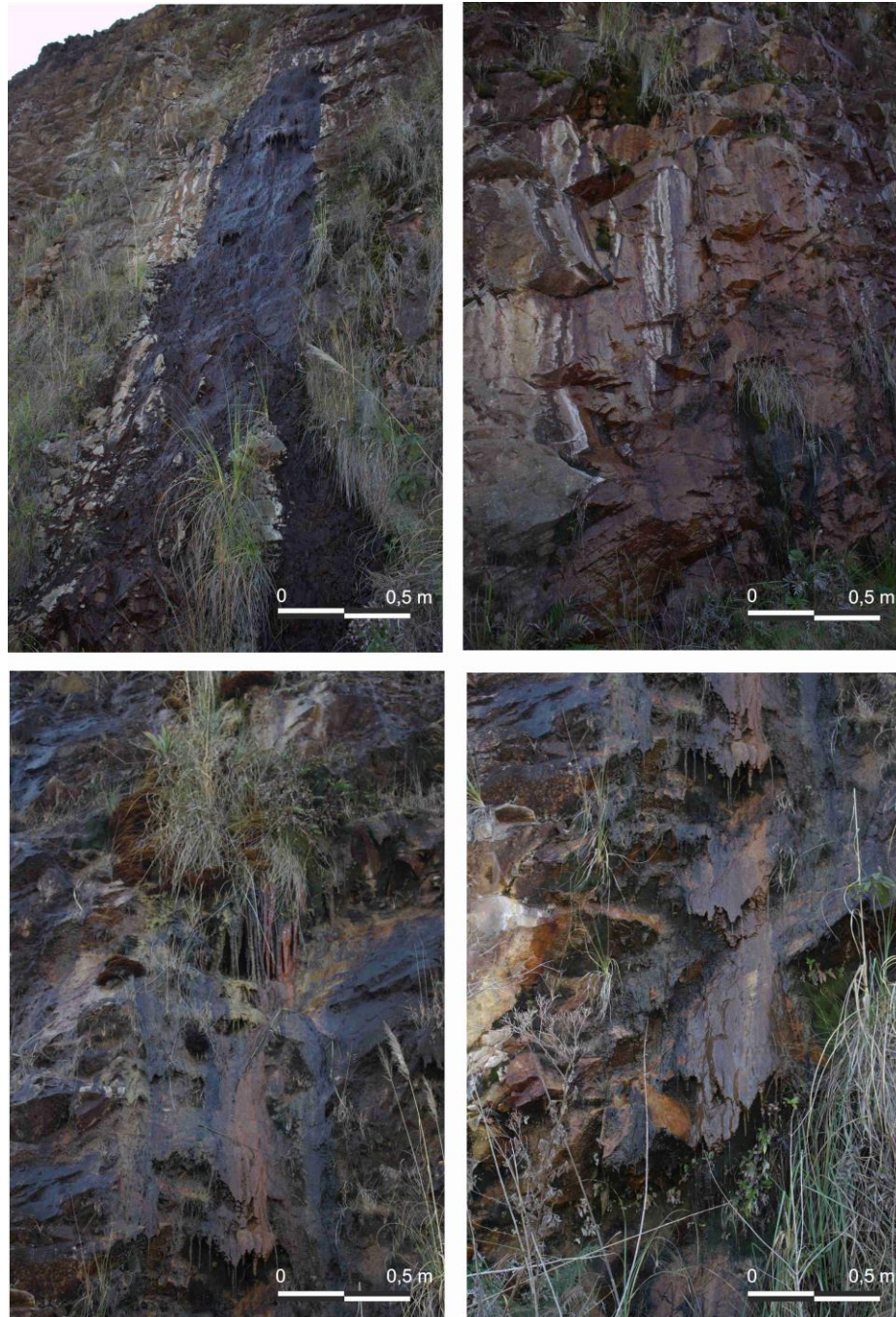
Figura 31 Distribuição das frequências de direção de mergulho dos planos de fraturas da frente NW



A frente NW quase não recebe luz direta e suas paredes são permanentemente úmidas com escoamento contínuo de água das fraturas dos maciços, o que configura uma coloração mais escura ao talude (Figura 32). As manchas esbranquiçadas também são presentes e indicam a percolação de antigos fluxos de água pelos maciços rochosos. Apesar da intensa percolação de água e do sistema de fraturas ser parcialmente concordante com a direção de mergulho do talude,

não foram registrados processos de dinâmica de encosta expressivos na frente NW, com exceção de queda de blocos de rocha com dimensões centimétricas acumulados na base do talude.

Figura 32 Intensa percolação de água na frente de lavra NW



6.2.4 Frente de lavra SW

Os taludes da frente SW apresentam direção NW-SE com mergulho para NE. As principais estruturas existentes estão representadas por fraturas e zonas de fraturas. A frente SW é marcada por duas famílias principais de fraturamento, com direção NW-SE e NE-SW, e ângulos de mergulho de 58° e 60°, respectivamente. A primeira família mergulha para NE, e consiste na direção de maior frequência, enquanto a segunda família apresenta caimento para SE (Figuras 33 e 34).

Figura 33 Estereograma com os planos de fratura da frente SW

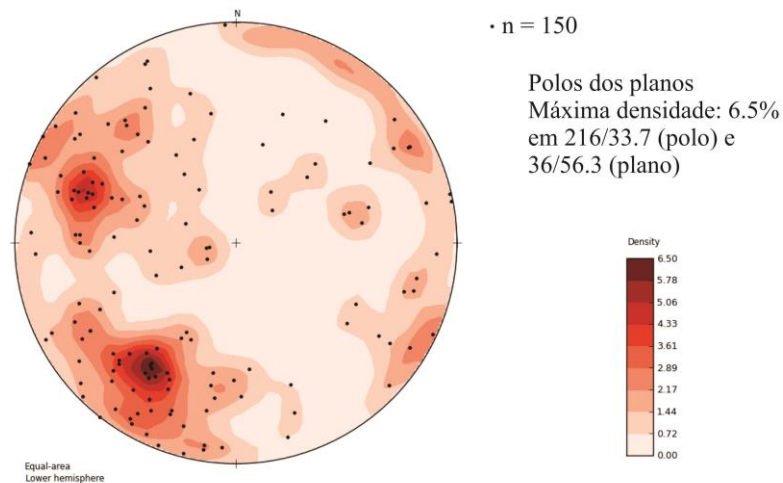
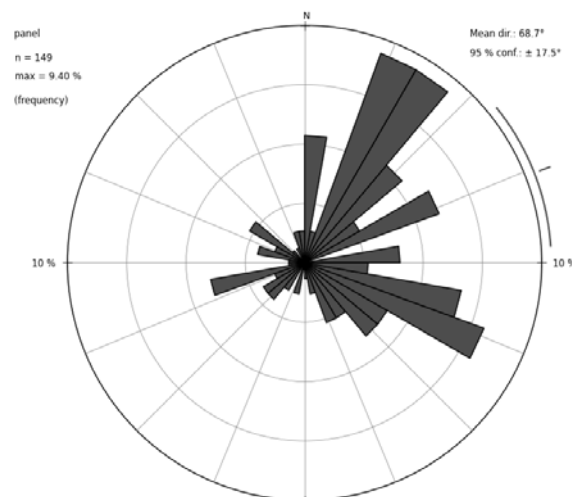
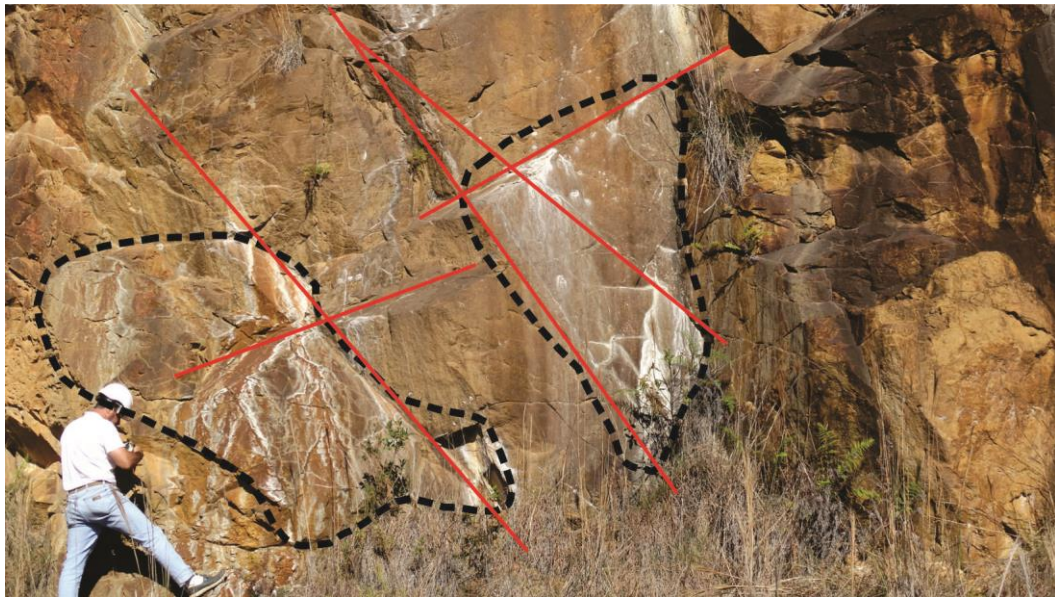


Figura 34 Distribuição das frequências de direção de mergulho dos planos de fraturas da frente SW



Em geral, as fraturas e zonas de fraturas não possuem preenchimento e sua abertura máxima é de 1 cm. Quando preenchidas, o material consiste em finas camadas argilosas marcadas pelo crescimento de gramíneas. Um aspecto marcante da frente SW é a presença de manchas esbranquiçadas de material caolínítico originado pela percolação de água nos taludes, que coincidem com zonas de intersecção entre as duas famílias de fraturas identificadas pelo levantamento estrutural (Figura 35).

Figura 35 Indícios de percolação de água na frente de lavra SE e o sistema de fraturas relacionadas à passagem de fluido



Fonte: Autoria própria

O padrão de fraturamento também favorece a ocorrência de processos de dinâmica de encosta, no caso escorregamentos em cunha e quedas de blocos (Figuras 36 e 37). A intersecção dos planos de fratura fornece o chamado lineamento de intersecção, a partir do qual é possível prever a ocorrência de escorregamento em cunha devido à sua relação angular com a inclinação do talude (Figura 38). A atitude da linha de intersecção é 069/54.

As superfícies de escorregamento alcançam dimensões aproximadas de 16 m de comprimento no eixo de intersecção entre os planos de descontinuidade. Os escorregamentos em cunha afetam três níveis de bancadas da frente SW, cujo material transportado é acumulado na base do talude e impede o acesso à área lateral da frente SW. O intenso fraturamento do maciço

também viabiliza a ocorrência de queda de blocos dos taludes, com dimensões média de 30 cm, associada às zonas de alteração intempérica, caracterizada por porções de coloração bege, e porções esbranquiçadas devido à percolação de fluxos de água.

Figura 36 Escorregamento em cunha registrado na frente SW



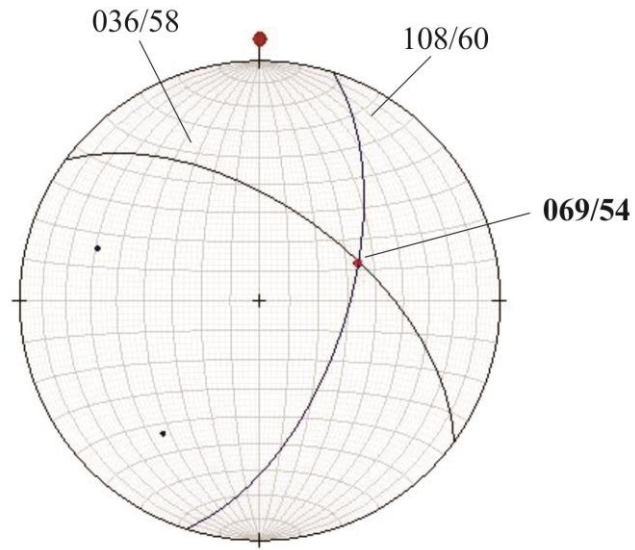
Fonte: Autoria própria

Figura 37 Acúmulo de blocos e matacões na base do talude da frente SW



Fonte: Autoria própria

Figura 38 Linha de intersecção dos planos de fratura na frente SW



7 DISCUSSÃO

7.1 Diagnóstico hidrogeológico

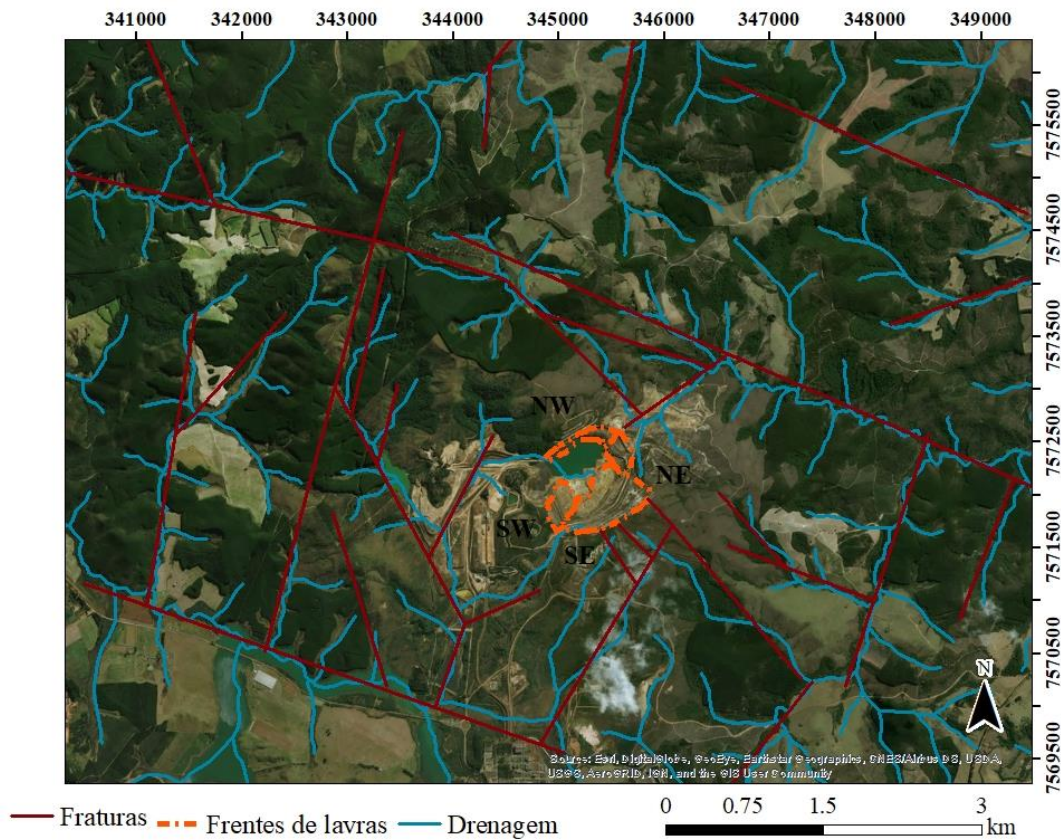
O levantamento estrutural realizado na Mina Osamu Utsumi indicou que as principais famílias de fraturas apresentam direção NE-SW com mergulho para NW e subordinadamente direção NW-SE com mergulho tanto para NE quanto para SW. O padrão de fraturamento é o mesmo identificado por Scudino (1992), que determinou uma orientação preferencial de N55-60W e N30-45E para as grandes estruturas rúpteis presentes no Maciço Alcalino de Poços de Caldas, cuja direção NW estaria relacionada ao embasamento cristalino e a direção NE ao aparelho vulcânico.

Ao correlacionar os padrões de fraturamento local e regional, é possível afirmar que as estruturas rúpteis presentes na Mina Osamu Utsumi são provenientes de atividades vulcânicas e que, além das fraturas, brechas e veios também preenchem o antigo conduto vulcânico (BIONDI, 1976). Essas feições típicas de regime rúptil fizeram com que os fonólitos e nefelina sienitos adquirissem uma porosidade secundária, o que aumentou a permeabilidade das rochas e fez com que a área pudesse atuar como um sistema de aquífero fraturado.

A partir do trabalho de Waber *et al* (1992) é possível afirmar que a rede de drenagem do Maciço Alcalino de Poços de Caldas apresenta um forte controle estrutural, cujos canais fluem da porção sudeste em direção à porção noroeste. A figura 39 ilustra a correlação das zonas de fratura regional e o alinhamento das drenagens nas direções NE e NW, assim como a proximidade desses condutos com a cava da mina. Esse cenário sugere que essas grandes estruturas são capazes de direcionar os fluxos d'água para áreas próximas à cava e as descontinuidades locais se encarregam de difundir o fluxo subterrâneo por todo o maciço rochoso.

Essa configuração estrutural é coerente com os dados obtidos pelo levantamento dos planos de fraturas presentes na Mina Osamu Utsumi, com direção NE-SW e caimento para NW, o que permite afirmar que os fluxos de água que percolam as fraturas dos maciços rochosos são canalizadas preferencialmente para NW e são transportados pela bacia hidrográfica do Ribeirão das Antas em direção ao Município de Poços de Caldas e Águas da Prata.

Figura 39 Padrão de drenagem condicionado ao controle estrutural de fraturas regionais próximo à Mina Osamu Utsumi



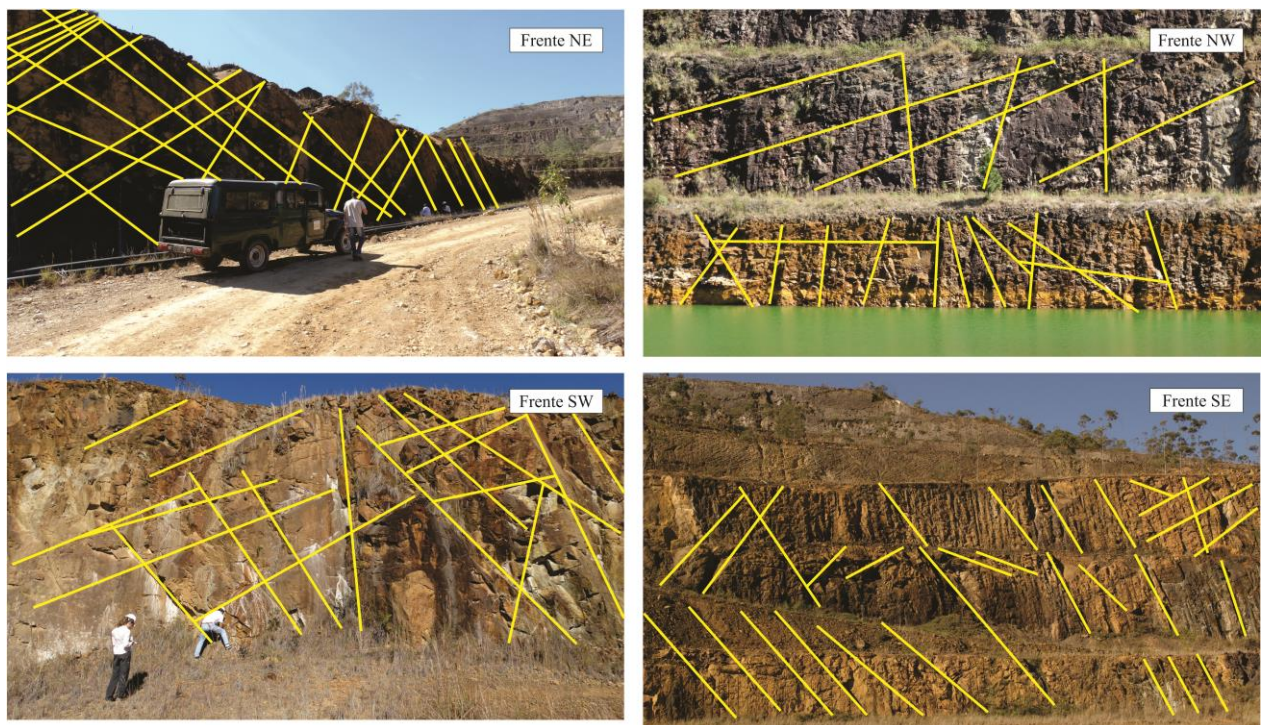
Em escala local, a análise do padrão de fraturamento indica que, em todas as frentes de lavra, a maior parte dos planos de fraturas se projetam para dentro da cava da mina, o que favorece a canalização da água para o centro da mina em uma espécie de bacia que coleta as águas provenientes do maciço rochoso. As famílias de fraturas se intersectam e formam canaletas que mergulham em direção a cava, por onde é possível observar a surgência de água. As discontinuidades da Mina Osamu Utsumi com direção NW são essenciais para a circulação das águas dentro do maciço rochoso, pois são elas que permitem o constante abastecimento da Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas (IPT, 1976; ALBERTI, 2017).

O simples fato de haver um sistema de fraturas que corta o maciço da cava não é suficiente para explicar a constante surgência de água nas frentes de lavra. É preciso que as discontinuidades estejam espacialmente distribuídas e conectadas para que seja possível o fluxo subterrâneo de água em meio fraturado. Para que os fluxos de água possam fluir pelas

descontinuidades, é preciso que a sua persistência seja maior que o seu espaçamento para que haja uma boa condutividade hidráulica do sistema (WYLLIE e MAH, 2004).

A persistência é representada pela extensão tanto horizontal quanto vertical das fraturas, enquanto o espaçamento consiste na distância média entre os planos de fratura e pode ser classificado de acordo com a sua densidade. Em geral, as fraturas da Mina Osamu Utsumi apresentam grande continuidade vertical e horizontal (ISRM, 1983), observadas em sucessivos níveis de bancadas e conectadas com a face do talude (Figura 40). Já a distância média entre os planos de fratura compreende o intervalo de 1 a 3 m, o que caracteriza as frentes com fraturas afastadas a muito afastadas e pouco densas (ABGE, 1983). A relação entre os dois parâmetros permite uma boa condutividade hidráulica dentro dos maciços rochosos da mina e a posterior surgência de água na face dos taludes, principalmente nas frentes SE, SW e NW.

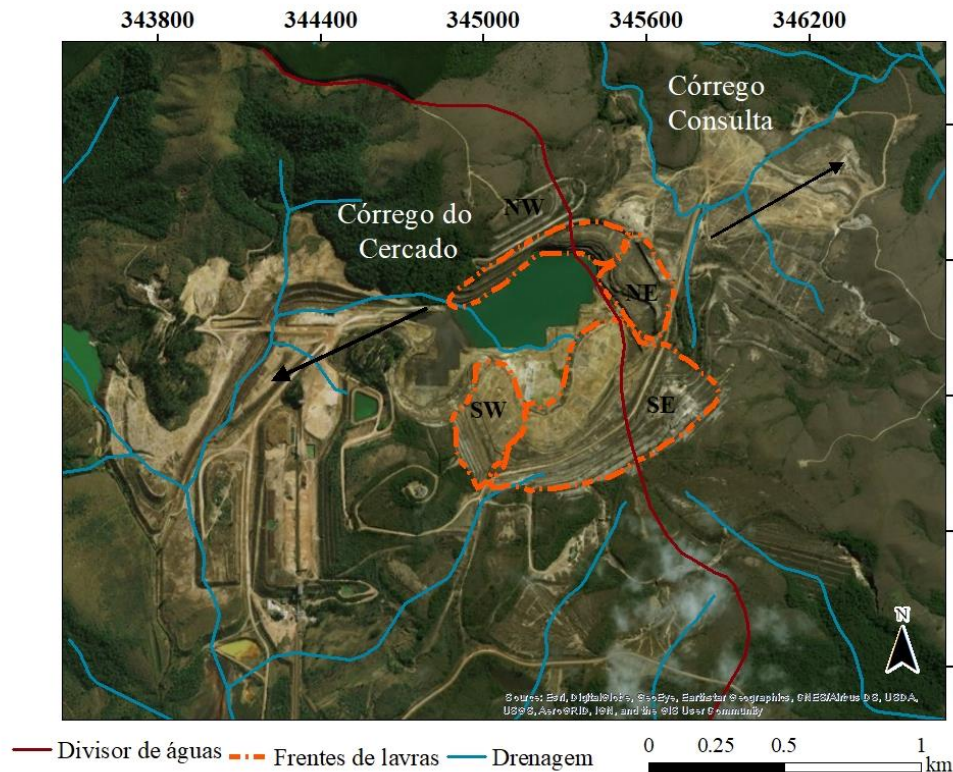
Figura 40 Persistência das descontinuidades nas frentes de lavra



Os fluxos de água das frentes SE, SW e NW são canalizadas pelo Córrego do Cercado e fluem em direção ao Ribeirão das Antas. A frente NE, por outro lado, não apresenta evidências de percolação de água nos maciços rochosos. A ausência de indícios de percolação de água se deve ao fato da frente NE estar localizada do outro lado do divisor de águas que separa as bacias

hidrográficas do Ribeirão das Antas e Rio Verde (Figura 41). O Córrego Consulta é o responsável por canalizar as águas da porção nordeste da cava da mina e transportá-las em direção ao Rio Verde. Em escala regional, não é observado um sistema de fratura expressivo que canalize o fluxo subterrâneo próximo à frente NE, o que justifica o menor aporte de água e até mesmo a ausência de indícios de fluxo.

Figura 41 Direção do fluxo dos Córregos do Cercado e Consulta em relação às frentes de lavra



A intensa percolação de água nos maciços faz com que gradualmente a resistência do material geológico seja comprometida, com perda de coesão e aumento da sua mobilidade. Esse cenário é observado nas porções mais intemperizadas das frentes de lavra, onde as rochas foram alteradas para solos friáveis com remoção de grande parte dos seus minerais constituintes. De forma similar, os elementos contaminantes, como metais pesados e radioativos, também são lixiviados das rochas e transportados pelos fluxos subterrâneos até o lago da cava. Quando a água chega na cava, suas propriedades químicas foram profundamente alteradas, com índice de pH baixo e com altas concentrações de elementos radioativos e metais pesados, o que caracteriza a chamada drenagem ácida. Assim, a origem desse fenômeno está ligada com a constante

percolação de fluxo subterrâneo nos maciços rochosos que são intensamente intemperizados. O aumento da mobilidade química de elementos poluentes e danosos à qualidade da água faz com que seja necessário o constante tratamento dos efluentes para que essa água possa ser lançada no sistema de drenagem da região.

7.2 Diagnóstico geotécnico

Além dos processos geológicos, o desmonte dos maciços para a implantação da mina a céu aberto também atuaram para o aumento da porosidade e permeabilidade das rochas. Durante os processos de escavação a céu aberto, o estado de tensões iniciais é perturbado e ocorre a redistribuição das tensões no maciço de rocha, com o desenvolvimento de uma zona de alívio nas proximidades da face do talude. A redução das tensões normais pode gerar a abertura de fraturas pré-existentes e ocasionar escorregamentos devido à diminuição da resistência ao cisalhamento da rocha. No caso da Mina Osamu Utsumi, o desmonte do maciço de rochosa pode ter contribuído para o aumento da abertura e da dimensão das fraturas pré-existentes e que, eventualmente, foram conectadas e formaram caminhos onde fosse possível a percolação dos fluxos de água em direção à cava da mina. Stacey (1973) e Sjöberg (1999) afirmam que as tensões induzidas pela escavação são paralelas e perpendiculares à face do talude, o que favorece a concentração das tensões na base do talude, aumento da tensão compressiva e de cisalhamento, e a redução da sua estabilidade.

A relação entre a inclinação da face do talude e o ângulo de mergulho do plano de fratura é um importante fator que permite analisar cinematicamente a ocorrência de escorregamentos (WYLLIE e MAH, 2004). Caso a face do talude apresente um ângulo de inclinação menor que a linha de intersecção entre dois planos de fratura, é provável que não haja escorregamento na região do talude. Por outro lado, caso o ângulo de inclinação do talude seja superior ao dos planos de fraturas, a estabilidade do talude é comprometida e a chance de um escorregamento ocorrer é alta. Essa última situação é descrita em todas as frentes de lavra da Mina Osamu Utsumi, cujos taludes apresentam ângulo de inclinação de aproximadamente 80° e os planos de fratura variam entre 38° a 62° . Contudo, os escorregamentos planares foram diagnosticados apenas na frente SE, cuja relação angular entre o talude e o plano de fratura é mais acentuada e, devido a maior percolação de água no maciço, o material rochoso perde sua coesão e fica mais suscetível à ocorrência de escorregamento (Figura 42).

Em escorregamentos em cunha, a relação angular leva em consideração a linha de intersecção entre dois planos de fratura e o ângulo de inclinação do talude. A direção de escorregamento das cunhas cinematicamente admissível é menos restritiva em relação aos escorregamentos planares, uma vez que existem dois planos que podem formar uma zona de deslizamento.

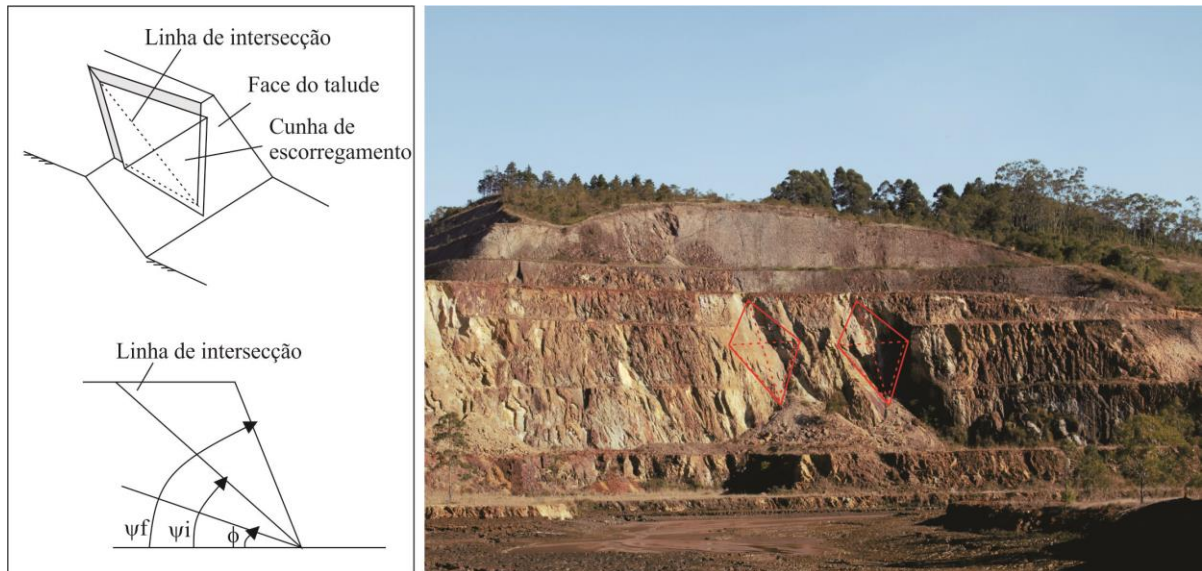
Para que um escorregamento em cunha ocorra, é preciso que certas relações angulares sejam respeitadas. Primeiramente, a linha de intersecção entre os dois planos de fratura deve obrigatoriamente mergulhar para fora do talude. O caimento do lineamento (ψ_i) deve ser menos inclinado que o mergulho da face do talude (ψ_f), porém mais íngreme que o ângulo de fricção médio (ϕ) dos dois planos de fratura (HOEK e BRAY, 1981; WYLLIE e MAH, 2004) (Figura 43). Essa situação foi constatada nas frentes SE e SW, cujo o mergulho de 80° da face do talude é superior à linha de intersecção dos planos de fratura, com valores de 51° e 54° respectivamente, o que resulta nos escorregamentos em cunha.

Figura 42 Relação angular entre o plano de fratura e a face do talude em condições instáveis



Fonte: Própria autoria

Figura 43 Condições estruturais para a ocorrência de escorregamento em cunha na frente SW



Fonte: Hoek e Bray (1981)

As quedas de blocos também estão relacionadas ao sistema de fraturas predominante na cava e a perda de coesão do material rochoso na face dos taludes de mineração. O acúmulo de blocos é observado na base dos taludes das frentes SE, SW e, em menor proporção, NW. Essas são as frentes onde o maciço está mais suscetível ao intemperismo devido ao fluxo de água.

Um conceito envolvido na ocorrência de instabilidades em taludes é o de alterabilidade, que se refere à estabilidade química de rochas com diferentes composições mineralógicas, submetidas às mesmas condições de alteração na superfície terrestre (GOLDICH, 1938). A assembleia mineralógica das rochas presentes na Mina Osamu Utsumi é altamente suscetível aos processos intempéricos e à alterabilidade, devido à sua natureza alcalina intrusiva. A constante percolação de água faz com que haja uma perda da resistência mecânica do material rochoso e provoca a redução do fator de segurança dos taludes do empreendimento. Como consequência, a fácil desagregação do material viabiliza o seu transporte ao longo dos planos de fratura.

7.3 Soluções geotécnicas para estabilidade em taludes de mineração

Os levantamentos estruturais dos planos de fratura e as observações em campo permitiram a identificação de três principais problemas geotécnicos referentes à estabilidade dos taludes de

mineração: escorregamento planar, escorregamento em cunha e queda de blocos. Essas feições foram observadas principalmente nas frentes SE, SW e, em menor proporção, NW, conforme discutido nos capítulos anteriores (Figura 44).

O fato das frentes constituírem as principais vias de acesso à cava da mina, faz com que a manutenção dos taludes seja essencial para a continuidade do processo de descomissionamento e eventuais estudos a serem conduzidos próximo à essa área.

Apesar dos taludes de mineração tolerarem certo grau de instabilidade, é preciso que haja um acompanhamento contínuo da movimentação das encostas, a fim de garantir a segurança daqueles que trabalham no empreendimento ou, caso em operação, a produtividade da mina.

No caso da Mina Osamu Utsumi, as medidas de remediação devem levar em consideração o fato do empreendimento estar em fase de descomissionamento. Isso significa que implementar medidas de alto custo e complexidade, porém de excelente qualidade, não representa uma relação de custo benefício vantajosa para a INB, uma vez que o minério não é mais explorado e as instabilidades dos taludes não afetariam a produção da mina. Assim, é preciso achar o equilíbrio entre custo, qualidade e obras geotécnicas que garantam um local de trabalho seguro para os funcionários que ainda trabalham na mina.

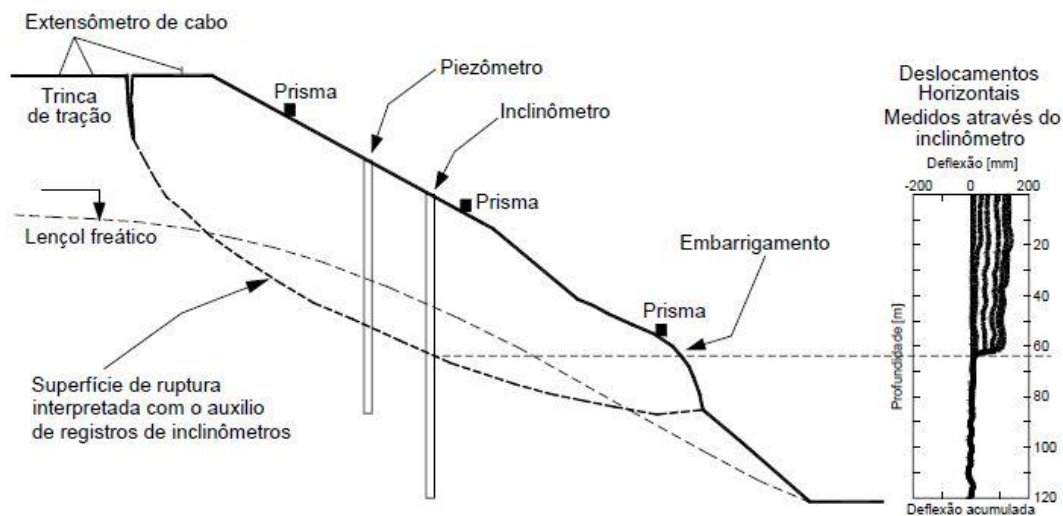
Figura 44 Identificação dos principais problemas geotécnicos observados em cada frente de lavra



A principal medida adotada em minas à céu aberto é o constante monitoramento e controle geotécnico dos taludes. O controle geotécnico está relacionado com a observação sistemática e o diagnóstico de situações anômalas, assim como foi realizado no presente estudo.

A instrumentação é um meio determinante no processo de monitoramento. Nesse processo, é imprescindível o uso de equipamentos que permitam efetuar medições dos deslocamentos relativos, rotações, pressão da água, variação de tensões e orientação dos deslocamentos (TORRES e GAMA, 2012; CURI, 2014). Os instrumentos mais utilizados são piezômetros e medidores de nível da água, marcos e prismas para a medição de deformação e inclinômetros e extensômetros de fios e barras para medir a movimentação dos taludes (Figura 45).

Figura 45 Instrumentação para o monitoramento e controle geotécnico de taludes



Fonte: Zea Huallanca (2004)

As obras de estabilização a serem implementadas, quando são identificados movimentos de massa, são baseadas em estudos que consideram as características particulares do meio físico e os processos de instabilidade envolvidos (CARVALHO, 1991). Um projeto de obra de estabilização pode ou não utilizar elementos de contenção, de acordo com as normas ABNT 11682/1991.

No caso de obras sem elementos de contenção, as medidas comumente adotadas consistem: (1) na modificação da geometria do talude por retaludamento total ou parcial de solo ou rocha, desmonte de partes instáveis, aterro estabilizante de pé de talude; (2) modificação do regime

geohidrológico com drenos sub-horizontais profundos, poços ou drenos verticais de rebaixamento de nível freático, galerias de drenagem, trincheiras drenantes; (3) melhoria da resistência ao cisalhamento do solo e de zonas de fraqueza de terrenos rochosos com injeção de calda de cimento ou produtos químicos, preenchimento de fendas em taludes rochosos com argamassa de cimento;

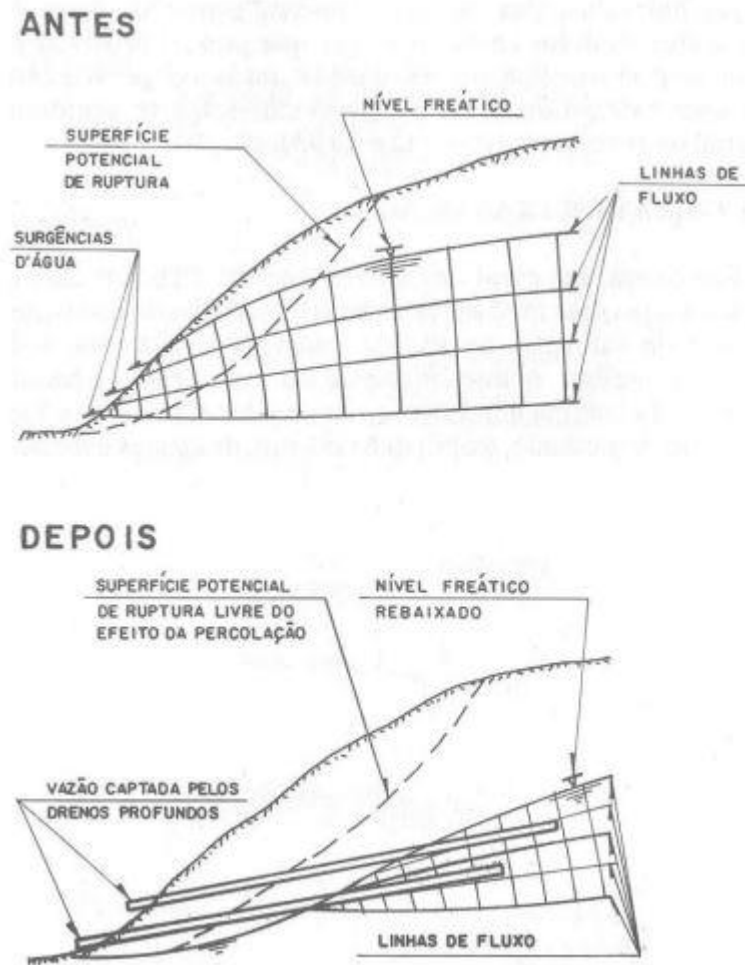
As obras de estabilidade com elementos de contenção englobam: (1) estruturas de alvenaria ou concreto: muros de arrimo de peso, muros esbeltos de paramento inclinado na direção do talude, muros a flexão de concreto armado ou protendido; (2) estruturas chumbadas ou ancoradas: estruturas chumbadas ou ancoradas na fundação, estruturas com ancoragens passivas em blocos ou placas verticais, cortinas com ancoragens injetadas e protendidas; (3) estruturas diversas e dispositivos de reforço do terreno: telas de aço galvanizadas fixadas com chumbadores, gunitagem com ou sem malha fixada, chumbadores e tirantes protendidos em taludes rochosos, estacas-raízes, pressiancoragens, gabiões, aterro de base de taludes com geossintéticos, microancoragens, terra-armada, etc.

Para a estabilidade dos taludes da Mina Osamu Utsumi podem ser adotados os dois tipos de obras de modo complementar. Entre os métodos citados anteriormente, quatro deles merecem destaque: retaludamento, instalação de drenos sub-horizontais profundos (DHPs), injeções em maciços rochosos e ancoragens.

O retaludamento faz ajustes à geometria dos taludes da mina por meio da suavização do seu ângulo de inclinação, o que permite a transferência do peso da crista para o pé do talude. Esse tipo de obra é amplamente usado devido à sua simplicidade e eficácia. De acordo com Carvalho (1991), para qualquer tipo de solo ou rocha, em qualquer condição de ocorrência e sob a ação de quaisquer esforços, sempre existirá uma condição geométrica de talude que oferecerá estabilidade ao maciço.

Como recurso complementar, a instalação de drenos horizontais profundos (DHPs) pode contribuir para a captação e o direcionamento das águas do escoamento superficial, assim como a drenagem de parte da água que percola no maciço (Figura 46). O sistema tem por objetivo estabelecer comunicação entre a pressão atmosférica e a pressão interna do maciço rochoso, que proporciona um alívio da pressão do aquífero a uma distância conveniente da face do talude. Pinotti e Carneiro (2013) afirmam que, para melhor eficiência, os DHPs devem ser instalados no maciço de modo que a extensão imersa do tubo filtrante no aquífero seja a maior possível.

Figura 46 Estabilização de talude por drenos horizontais profundos



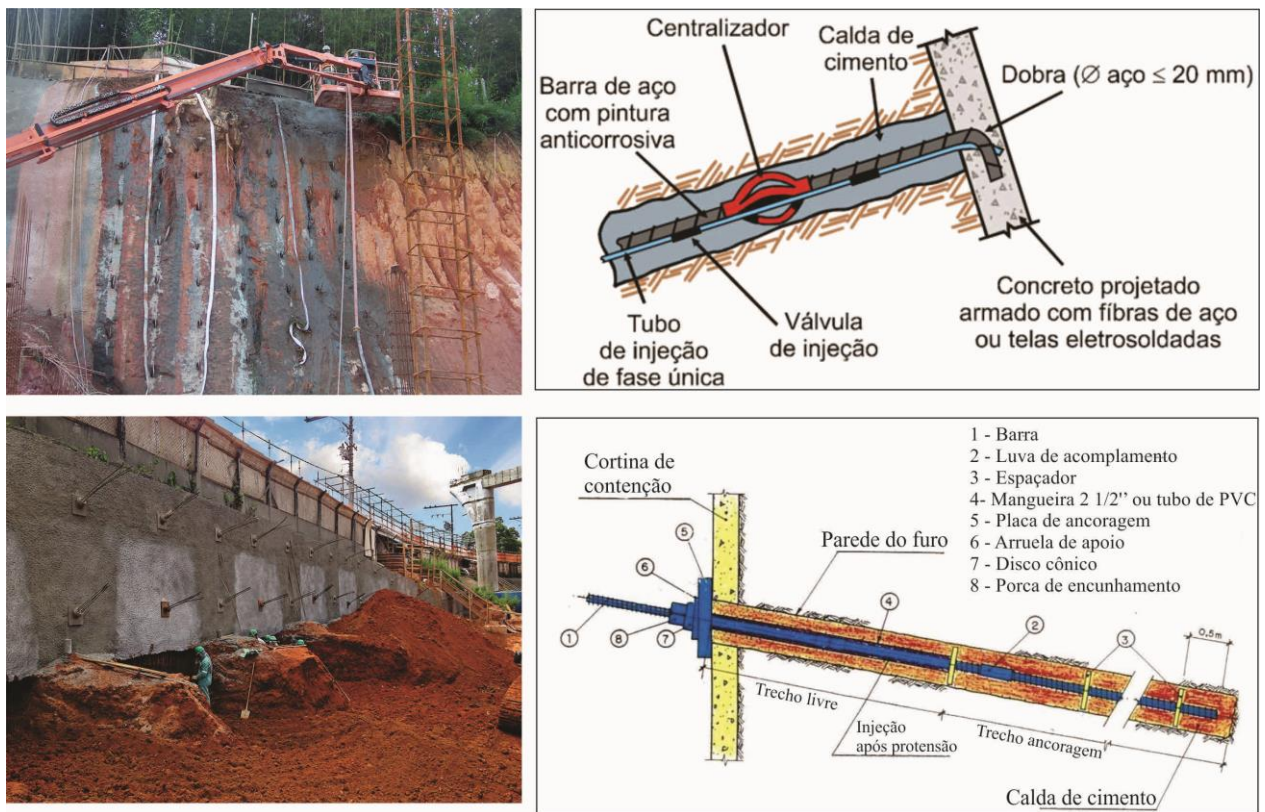
Fonte: Carvalho (1991)

As injeções em maciços rochosos têm como finalidade principal consolidar e impermeabilizar o material. As injeções de impermeabilização são mais utilizadas em barragens, enquanto as injeções de consolidação são mais empregadas nos maciços rochosos de fundações e taludes (PINOTTI e CARNEIRO, 2013). Caso o maciço apresente um intenso sistema de fraturamento, como é o caso do maciço da cava da Mina Osamu Utsumi, a injeção para impermeabilização efetuada antes da escavação a partir da frente a ser escavada. As injeções também são utilizadas em casos em que é preciso consolidar materiais soltos para evitar queda de blocos.

Em relação às obras com elementos de contenção, as ancoragens introduzem um elemento resistente por meio de perfuração no maciço natural para conter deformações ou deslocamentos do maciço, o que proporciona uma melhora na sua resistência mecânica (MORE, 2003).

Existem dois tipos de ancoragens: as ativas, que recebem o nome de tirantes, e as passivas, conhecidas como chumbadores (Figura 47) (PINOTTI e CARNEIRO, 2013).

Figura 47 Obras de estabilidade de taludes por ancoragem ativa - tirante (abaixo) e passiva - chumbador (acima)



Fonte: Solotrat

Os chumbadores são geralmente utilizados como sistemas de suporte temporário, mas podem ser empregados em obras definitivas desde que sejam permitidas as deformações necessárias para eficácia do sistema. Esse sistema é usado para a contenção de blocos de rocha, reforço de paredes de escavações ou na fixação de telas metálicas em concreto projetado, dutos e outras estruturas. Os tirantes evitam as quedas de blocos de rocha dos taludes além de atuarem na contenção de blocos ou cunhas de rochas isoladas por um sistema de fraturamento, quando utilizados em sistemas temporários. Quando usadas em sistemas de suporte definitivo, os tirantes

são dispostos de forma sistemática, em malha geométrica, o que gera um sistema de compressão no maciço logo atrás da superfície de escavação ou do talude de mineração e evita eventuais deslocamentos ou deformações no maciço rochoso.

8 CONCLUSÕES

A análise estrutural e local do maciço rochoso foi satisfatória no reconhecimento dos principais sistemas de fraturas relacionados aos condicionantes geotécnico e hidrogeológico geotécnico da cava da mina Osamu Utsumi. Aparentemente existem caminhos preferenciais de fluxo no maciço fraturado, talvez condicionados por abertura de sistemas pré-existentes, durante as sucessivas detonações utilizadas durante a operação mineira. O alívio de pressão no maciço e a exposição de determinados sistemas de falhas e ângulos de avanço de taludes resultou e condições ideais para escorregamentos planares e em cunha.

Os principais sistemas de fratura apresentam direção NE-SW com caimento para NW e direção NW-SE com caimento tanto para NE quanto para SW, estruturação coerente com o contexto regional. Em escala local, os planos de fraturas, em todas as frentes de lavra, apresentam mergulho em direção à cava da mina e formação de canaletas pela intersecção das discontinuidades, o que a caracteriza como uma espécie de bacia coletora dos fluxos subterrâneos. A relação entre a persistência e a distância média entre as fraturas permite uma boa condutividade hidráulica dentro dos maciços rochosos da mina e a posterior surgência de água na face dos taludes.

Evidências claras de fluxos de água foram reconhecidas nas frentes SE, SW e NW. Na frente NE, o esperado seria uma direção de fluxo para SW com sentido para a área da cava. Contudo, seu fluxo de água migra para direção NE e é coletado pela bacia do Rio Verde, e não pela Bacia do Rio das Antas, como ocorre com as demais frentes de lavra. A ausência de um sistema de fratura regional expressivo que canalize o fluxo subterrâneo próximo à frente NE é outro fator que justifica o menor aporte de água e até mesmo a ausência de indícios de fluxo.

Foram constatados três principais problemas geotécnicos referentes à estabilidade dos taludes de mineração: escorregamento planar, escorregamento em cunha e queda de blocos. As instabilidades foram identificadas nas frentes SE, SW e, em menor proporção, NW. A ocorrência dos movimentos de massa é atribuída ao padrão de fraturamento dos maciços e, devido a constante percolação de água, o intenso processo de intemperismo químico que reduz a resistência e coesão do maciço rochoso. O constante monitoramento dos taludes, retaludamento com suavização do ângulo de inclinação das encostas, instalação de drenos horizontais profundos e injeções em maciços rochosos e ancoragens, são fundamentais para estabilidade estrutural do maciço e segurança operacional na atual fase de descomissionamento da área.

9 REFERENCIAS

- ALBERTI, H. L. C. **Caracterização fisiográfica e avaliação hidrológica na bacia do Ribeirão das Antas, Planalto de Poços de Caldas, MG.** 2008. 114p. Dissertação de mestrado em Geociências. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas -SP. 2008.
- 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. 194P. Tese de Doutorado em Geociências. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. 2017.
- ALMEIDA, F. F. M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 16, p. 325-340, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Métodos para descrição quantitativa de discontinuidades em maciços rochosos.** São Paulo, ABGE, 1983. 132P. (Caderno Técnico).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de taludes – Procedimento.** Rio de Janeiro. 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724: Informação e documentação: Trabalhos acadêmicos – Apresentação.** Rio de Janeiro. 2011.
- ÁLVAREZ-GOMES, J. A. **Estereográfica em Código Abierto.** 2011. Disponível em: <<https://josealvarezgomez.wordpress.com/category/tratar-datos/>> Acesso em: 20 jun. 2018.
- BIONDI, J. C. Relatório de cálculo de reserva do C-09. NUCLEBRÁS, Rio de Janeiro, 30p. 1976 (unpublished).
- 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.
- CARNEIRO, C. D. R. **Projeção estereográfica para análise de estruturas: Programas Ester e Trade. Fundamentos Teóricos, Exercícios e aplicações em microcomputador, Laboratório e Campo.** São Paulo: IPT, 1996.
- 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.
- CARVALHO, P. A. S. **Manual de geotecnia: Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas.** São Paulo: Departamento de Estradas e Rodagens do Estado de São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991, 388p.
- CIPRIANI, M. **Mitigação dos impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio.** 2002. 363p. Tese de doutoramento. Universidade Estadual de Campinas. 2002.

CRUZ, W. B.; PEIXOTO, C. A. M. As águas termais de Poços de Caldas, MG – Estudo experimental das interações água-rocha. **Revista Brasileira de Geociências**, 19(1), p. 76-86, 1989.

CURI, A. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. Oficina de textos. 2014. 223p.

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

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.

FANTI, A. C. **Investigação de aquífero fraturado para entendimento de fluxo e transporte de contaminantes clorados: Estudo de caso em Valinho, SP**. 2015. 159p. Dissertação de mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2015.

FERNANDES, A. J. **Tectônica Cenozóica na porção média da Bacia do Rio Piracaia e sua aplicação à hidrogeologia**. 1997. Tese de doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FERNANDES, H. M.; FRANKLIN, M. R. Assessment of acid rock drainage pollutants release in the uranium mining site of Poços de Caldas – Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 54, p. 5-25, 2001.

FLETCHER, C. J. N.; LITHERLAND, M. The geology and tectonic setting of the Velasco Alkaline Province, Bolivia. **Journal of the Geological Society of London**. 138(5), p. 541-548, 1981.

FORMAN, J. M. A.; WARING, M. H. Uranium in South America with emphasis on the Brazilian Uranium Province. 26th Int. Geol. Congress, Colloquium on Energy Resources, Paris. 1981.

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.

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

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.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2013. 166p.

GOLDICH, S. S. A study in Rock Weathering. **Journal of Geology**, v. 46, p. 17-58, 1938.

GROHMANN, C. H.; CAMPANHA, G. A. C.; SOARES JUNIOR, A. V. Openstereo: um programa livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. In: 13º Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, p. 15-19, Campinas, SP, 2011.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Blücher: USP, 1976. 170p.

HERZ, N. Time of spreading in the South Atlantic: information from Brazilian alkali rocks. **Geological Society of America Bulletin**, 88(1), p. 101-112, 1977.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. **Support of underground excavations in hard rock**. Rotterdam, Holanda: CRC Press, 2000. 223p.

HOEK, E.; BRAY, J. D. **Rock slope engineering**. CRC Press, 1981.

HOEK, E.; BRAY, J. **Rock slope engineering**. 4. Ed. New York: Taylor & Francis, 2004.

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

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Estudo geológico-geotécnico preliminar para a abertura da cava da Mina do Cerrado – Poços de Caldas MG**. Relatório 9.571. Volume 1,2,3. 1976.

ISRM. An empirical failure criterion for rock masses. In: 5th ISRM Congress, 1983, Melbourne, Australia. 1983. 8p.

KLEINMANN, R. L. P.; CREARAR, D. A.; PACELLI, R. R. Biogeochemistry of Acid Mine Drainage and a method to control acid formation. **Mining Engineering**, p. 300-305, 1981.

LAWN, B. R.; WILSHAW, T. R. **Fracture of Brittle Solids**. 2^a Ed., Londres: Cambridge University Press, 1993. 378p.

MACIEL, A. C. Formação de geólogos no Brasil e sua influência na prospecção, pesquisa e descoberta de jazidas de urânio. In: Gomes C. B. (org.). **Geologia USP – 50 anos**. Editora USP, São Paulo, 544p. 2007.

MAJDALANI, A. A.; TAVARES, A. M. **Status of uranium in Brazil**. IAEA – TECDOC 1258, IAEA, Vienna, p. 119-127, 2001.

MARSH, J. R. Relationship between transform directions and alkaline igneous rocks lineaments in Africa and South America. **Earth Planetary Science Letters**, 18(2), p. 317-323. 1973.

MIEKELY, N.; LINSALATA, P.; OSMOND, J. K. Uranium and thorium isotopes in groundwaters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro natural analogue sites, Poços de Caldas, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, 45, p. 345-363, 1992.

MORE, J. Z. P. **Análise numérica do comportamento de cortinas atirantadas em solos**. 2003. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

MURTA, F. C.; LEITE, A. L.; LIMA, H. M. Estudos cinéticos de sistemas de coberturas alcalinas em pilha de estéril para prevenção de drenagem ácida de mina. **Revista Brasileira de Geociências**, 38(2), p. 227-236, 2008.

NORDSTROM, D. K.; MCNUTT, R. H.; PUIGDOMÈNECH, I.; SMELLIE, J. A. T.; WOLF, M. Ground water chemistry and geochemical modelling of water-rock interactions at the Osamu Utsumi mine and the Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, 45, p. 249-287, 1992.

PINOTTI, A. M.; CARNEIRO, C. D. R. Geologia Estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no Granito Santos, SP. **Terrae Didática**, 9-2, p. 132-168, 2013.

REIS, R. C. **Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira-MG**. 2010. 145p. Dissertação de mestrado em Geotecnia. Escola de Minas de Ouro Preto – MG. 2010.

ROSTIROLLA, S. P.; MANCINI, F.; NETO, J. M. R.; FIGUEIRA, E. G.; ARAÚJO, E. C. Análise estrutural da Mina de Vazante e Adjacências: Geometria, cinemática e implicações para a hidrogeologia. **Revista Brasileira de Geociências**, 32(1), p. 59-68, 2002.

SADOWSKI, G. R. A possible relation between pulses of platform activation and plate kinematics. **Tectonophysics**, 143, p. 43-57, 1987.

SCARPELLI, A. G. **Classificação geomecânica aplicada à avaliação da estabilidade de taludes em minas de ferro do quadrilátero ferrífero**. 1994. 187p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

SCUDINO, P. C. B. **Caracterização hidrodinâmica do meio aquífero fraturado na área de Poços de Caldas e adjacências, mediante a análise do conteúdo radioisotópico das águas subterrâneas**. 1992. 146p. Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1992.

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.

SJÖBERG, J. **Analysis of large scale rock slopes**. 1999. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Engenharia de Minas, Lulea University of Technology, Suécia, 1999.

SOLOTRAT. Informações Técnicas. Disponível em: <http://www.solotrat.com.br/informacoes-tecnicas>. Acesso em 14 março de 2018.

SONOKI, I. K.; GARDA, G. M. Idades K/Ar de rochas alcalinas do Brasil Meridional e Paraguai Oriental: Compilação e Adaptação a novas constantes de decaimento. Instituto de Geociências/USP, Boletim Série Científica, 19, p. 63-85, 1988.

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.

STACEY, T. R. Stability of rock slopes in mining and civil engineering situations. National Mechanical Engineering Institute, **CSIR Report ME1202**, Pretoria. 1973.

TORRES, V. N.; GAMA, C. D. **Ingenieria ambiental subterránea y aplicaciones**. Córdoba: Fundación Empremin, 2012, 564p.

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

ULBRICH, H. H.; ULBRICH, M. N. C. The lujavrite and khibinite bodies of the Poços de Caldas Massif, southeastern Brazil: a structural and petrographical study. **Revista Brasileira de Geociências**, 30, p. 615-622, 2000.

URÂNIO DO BRASIL S.A. Síntese dos trabalhos – Gerência da Mina de Caldas. **Relatório Interno**, Urânio do Brasil, Poços de Caldas, MG. 1988.

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. Explor., 45, p. 53-112, 1992.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. **Rock Slope Engineering: Civil and Mining**. 4th Edition. Taylor & Francis, 2004. 431p.

ZEA HUALLANCA, R. E. **Mecanismos de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto**. 2004. 132p. Dissertação de mestrado em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2004.