

## EFEITO DA SATURAÇÃO DE ÁGUA EM DESCONTINUIDADES E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A RUPTURA DE TALUDES ROCHOSOS

Noreto Carvalhais Sena<sup>1</sup>; Daniel Prates Pederneiras Barbosa<sup>2</sup>; Wellison Martins Fonseca<sup>3</sup>, Fábio Soares Magalhães<sup>4</sup>, Yan Lucas de Oliveira Pereira dos Santos<sup>5</sup>

**Resumo** – A estabilidade de taludes rochosos é fortemente influenciada pela presença de água nas descontinuidades do maciço. Esta condição afeta diretamente a resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, age negativamente sobre o fator de segurança dos taludes rochosos. Este estudo tem como objetivo investigar o efeito da saturação em fraturas e planos de descontinuidades, avaliando como o aumento da pressão hidráulica intersticial pode comprometer a integridade dos maciços rochosos. Para tanto, serão abordados dois estudos de casos reais de rupturas em taludes de mineração a céu aberto por meio de mecanismos estruturalmente controlados, nos quais a água agiu como fator determinante no processo de deflagração do movimento de massa. No primeiro, observou-se que a saturação das fraturas promoveu uma perda significativa da resistência ao cisalhamento, facilitando o deslocamento dos blocos e possibilitando de ruptura. Já no segundo estudo, a elevação da pressão hidráulica intersticial reduziu drasticamente o fator de segurança, tornando o talude suscetível à ruptura e conseqüentemente à instabilidade global. Os resultados das análises confirmam que a água empoçada em bermas e/ou quando não direcionadas adequadamente, eleva a poropressão nas paredes das descontinuidades, o que desempenha um papel crítico na redução da estabilidade dos maciços rochosos. Esta constatação reforça a necessidade da implementação de sistemas de drenagem eficientes que, associados ao monitoramento geológico-geotécnico tornam-se ferramentas essenciais para mitigar os riscos de rupturas em taludes rochosos.

**Abstract** – The stability of rock slopes is strongly influenced by the presence of water in rock mass discontinuities, which directly affects shear strength and consequently reduces the safety factor of the slopes. This study aims to investigate the effect of water saturation in fractures and discontinuity planes, assessing how the increase in pore pressure can compromise the integrity of rock masses. To achieve this, two real case studies of structurally controlled failures in open-pit mining slopes are analyzed, where water played a key role in triggering mass movements. In the first case, it was observed that fracture saturation significantly reduced shear strength, facilitating block displacement and increasing the likelihood of failure. In the second case, the rise in pore pressure drastically decreased the safety factor, making the slope more susceptible to failure and leading to global instability. The results confirm that water ponding on berms or improper drainage increases pore pressure along discontinuity walls, playing a critical role in reducing rock mass stability. This finding underscores the necessity of implementing efficient drainage systems, which, when combined with geological-geotechnical monitoring, become essential tools for mitigating the risks of rock slope failures.

**Palavras-Chave** – Instabilidade de taludes em maciços rochosos; retroanálise; poropressão.

<sup>1</sup> Geól., MSc, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG (31) 3234-4003; noreto.sena@walmengenharia.com.br

<sup>2</sup> Geól. WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG (31) 3234-4003; daniel.prates@walmengenharia.com.br

<sup>3</sup> Geól. WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG (31) 3234-4003; wellison.fonseca@walmengenharia.com.br

<sup>4</sup> Geól. PhD, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG (31) 3234-4003; fabio.magalhaes@walmengenharia.com.br

<sup>5</sup> Geól. WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG (31) 3234-4003; yan.santos@walmengenharia.com.br

## 1. INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes em maciços rochosos é condicionada por uma série de fatores, dentre os quais se destacam as características intrínsecas dos materiais que os compõem, incluindo o litotipo, a presença de descontinuidades (fraturas, falhas, xistosidade), as propriedades de resistência dos materiais, a alteração devido ao intemperismo entre outros. Além disso, agentes externos como o carregamento sísmico, a sobrecarga superficial causada por construções ou pelo tráfego de equipamentos, bem como a atuação da pressão de água no interior desses maciços podem influenciar substancialmente na condição de estabilidade.

O presente trabalho visa demonstrar o efeito da saturação de água em descontinuidades e sua influência no processo de instabilização de maciços rochosos. Para tanto serão abordados dois estudos de casos reais de rupturas de taludes rochosos de mineração a céu aberto por meio de mecanismos estruturalmente controlados, nos quais a água agiu como fator determinante no processo de deflagração do movimento de massa.

## 2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DAS ÁREAS

Ambas as áreas de estudo estão compreendidas em minas a céu aberto que se desenvolvem majoritariamente em um contexto de rochas duras e competentes. Nos dois casos os perfis litomecânicos são similares, onde no topo ocorre uma camada com espessura variável de solo e saprolito, representando os maciços de pior classe geomecânica, sobrepostos a maciços rochosos com boa qualidade geomecânica, que tendendo a melhorar suas características à medida em que a profundidade aumenta. Uma das cavas é composta inteiramente por filitos grafitosos em diferentes níveis de alteração intempérica e a outra dominada por xistos variados, por vezes ricos em quartzo, sericita ou anfibólio.

Em cavas deste tipo, onde os taludes estão esculpados em rochas de alta resistência, as estruturas geológicas presentes funcionam como o principal fator condicionante na estabilidade e nos mecanismos de ruptura associados. Desta forma, o entendimento da geologia estrutural é extremamente necessário para se investigar as famílias de descontinuidades envolvidas nos movimentos de massa e entender as causas e os possíveis gatilhos destes eventos.

As rochas que afloram em ambas as cavas apresentam foliação proeminente e penetrativa, além disso, são cortadas por sistemas múltiplos de famílias de fraturas e falhas com atitudes distintas. A combinação dessas famílias de descontinuidades e a direção dos taludes determinam os mecanismos de ruptura cinematicamente possíveis de ocorrerem. Ressalta-se também que, em ambos os taludes, os desmontes a fogo que determinaram as suas geometrias não foram cuidadosos, propiciando a desarticulação dos blocos e a conseqüente abertura dos planos das descontinuidades.

## 3. MOVIMENTO DE MASSA

Os movimentos de massa em taludes rochosos ocorrem devido a uma combinação de fatores geológicos, geotécnicos e antrópicos, sendo frequentemente controlados pelas descontinuidades geológicas do maciço rochoso. Rupturas estruturalmente controladas são aquelas em que descontinuidades preexistentes, como falhas, fraturas, juntas e planos de estratificação ou foliação, exercem um papel determinante na instabilização do talude (Goodman, 1989; Hoek & Bray, 1981, Palmström & Stille, 2007). Esses mecanismos de ruptura podem ser classificados em diferentes tipos, como tombamento, deslizamento planar e cunha, dependendo da orientação das descontinuidades em relação à geometria do talude e às forças atuantes. A presença de água nos planos de fraqueza pode reduzir criticamente a resistência ao cisalhamento e atuar como um fator desencadeante de uma ruptura, enquanto processos erosivos e carregamentos dinâmicos, como sismos e atividades antrópicas, também podem contribuir para essa instabilização.

A água desempenha um papel fundamental no processo de instabilização de taludes rochosos, atuando de diferentes maneiras. Primeiramente, a presença prolongada de água nas

descontinuidades favorece o intemperismo químico e físico das superfícies, promovendo a alteração mineralógica e a degradação dos materiais de preenchimento, o que reduz a resistência ao cisalhamento ao longo dos planos de fraqueza. Além disso, a infiltração de água pode aumentar a pressão intersticial nos poros e nas fraturas, gerando uma poropressão que reduz o contato efetivo entre os blocos rochosos e diminui a coesão e o atrito ao longo das descontinuidades. Assim, a interação entre intemperismo e pressurização da água nos planos de fraqueza constitui um fator crítico para a estabilidade dos taludes rochosos, exigindo um enorme cuidado com relação à gestão das drenagens superficiais nos complexos de mineração, que se mal conduzido pode resultar em um eventual gatilho para deflagração de rupturas inesperadas.

*Softwares* de análise de estabilidade, como *Slide2*, *Swedge* e *RocPlane*, todos esses desenvolvidos pela empresa *Rocscience*, desempenham um papel essencial na avaliação da influência da água na estabilidade de taludes por meio de análises de equilíbrio limite. Essas ferramentas permitem a consideração dos efeitos da água nos maciços rochosos de diferentes formas, como a redução da resistência ao cisalhamento nos planos de descontinuidade devido à poropressão. O *Slide2*, por exemplo, possibilita a modelagem do nível freático e a inclusão de diferentes condições de drenagem para avaliar como a variação da carga hidráulica afeta o fator de segurança global. O *Swedge*, utilizado para análise de rupturas em cunha, permite incluir a pressão hidrostática nas descontinuidades, determinando seu impacto na estabilidade dos blocos potencialmente instáveis. Já o *RocPlane*, voltado para a análise de deslizamentos planares, considera os efeitos da poropressão ao longo dos planos de ruptura, o que reduz a capacidade da superfície de cisalhamento de resistir ao movimento do bloco rochoso. Dessa forma, esses *softwares* possibilitam uma avaliação quantitativa dos efeitos da água na estabilidade de taludes rochosos e fornecem um modelo preditivo acerca das condições máximas de saturação admissíveis.

## 4. ESTUDOS DE CASOS

### 4.1. CASO 1

O primeiro estudo de caso se refere a uma ruptura que ocorreu em taludes de uma mina de ouro composta por filitos grafitosos de elevada resistência, pertencentes a maciços classificados como classes geomecânicas I e II. Como pode-se observar na Figura 1, o rompimento do maciço rochoso se deu por um mecanismo estruturalmente controlado, formado por um par de descontinuidades, de orientações  $Fr1 = 320^\circ/52^\circ$  e  $Fr2 = 020^\circ/42^\circ$ , que conformaram uma geometria em cunha aberta. Estas estruturas possuem elevada persistência ( $> 20$  m), o que propiciou a instabilização de múltiplas bancadas. A cicatriz vista na imagem e a cinemática do movimento parecem indicar que um dos planos atuou como superfície de deslizamento, enquanto o outro teria desconfinado lateralmente a massa rompida.

Na análise das fotos de drone é possível observar a presença de água acumulada na berma imediatamente acima da ruptura, como visto na Figura 2. Em campo e nas imagens de maior detalhe é visto ainda a percolação de água em fluxo contínuo nas paredes das descontinuidades envolvidas no deslizamento, indicando a conexão dessa descontinuidade com a água armazenada no ponto acima.

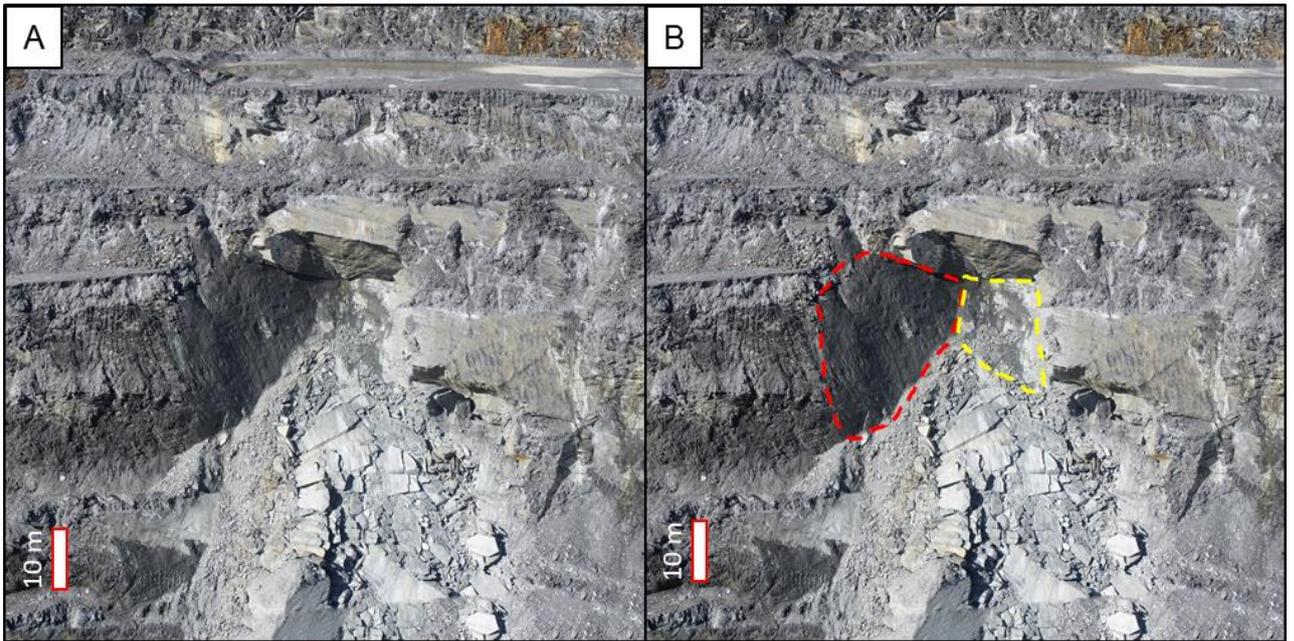


Figura 1. Destaque para os planos das descontinuidades estruturais condicionantes da geometria da ruptura analisada.



Figura 2. Água empoçada na rampa em região imediatamente acima da ruptura.

Observando-se a cicatriz da ruptura e analisando-se os dados estruturais coletados a partir da malha triangulada de alta resolução da área entende-se que o mecanismo de ruptura em cunha é aquele que melhor modela as condições do evento de instabilização do maciço rochoso. A Figura 3 mostra os planos envolvidos e as suas orientações espaciais.

Desta forma, observadas as evidências em campo de instabilização por este mecanismo e a verificação da sua possibilidade cinemática, foram feitas algumas simulações e análises de estabilidade utilizando-se o método de equilíbrio limite para verificação dos fatores de segurança. Foram simulados diferentes casos com auxílio do *software* SWEDGE (Figura 4) em que foram imputados os parâmetros de resistência das descontinuidades (Barton & Bandis, 1982) e do filito, considerada a geometria executada, e a presença ou não de água preenchendo as descontinuidades.

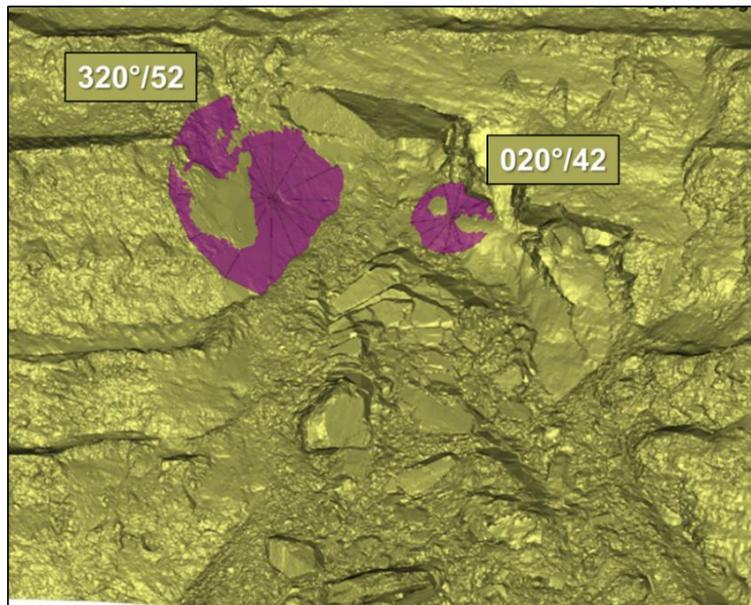


Figura 3. Planos estruturais medidos a partir da malha triangulada de alta resolução da região rompida.

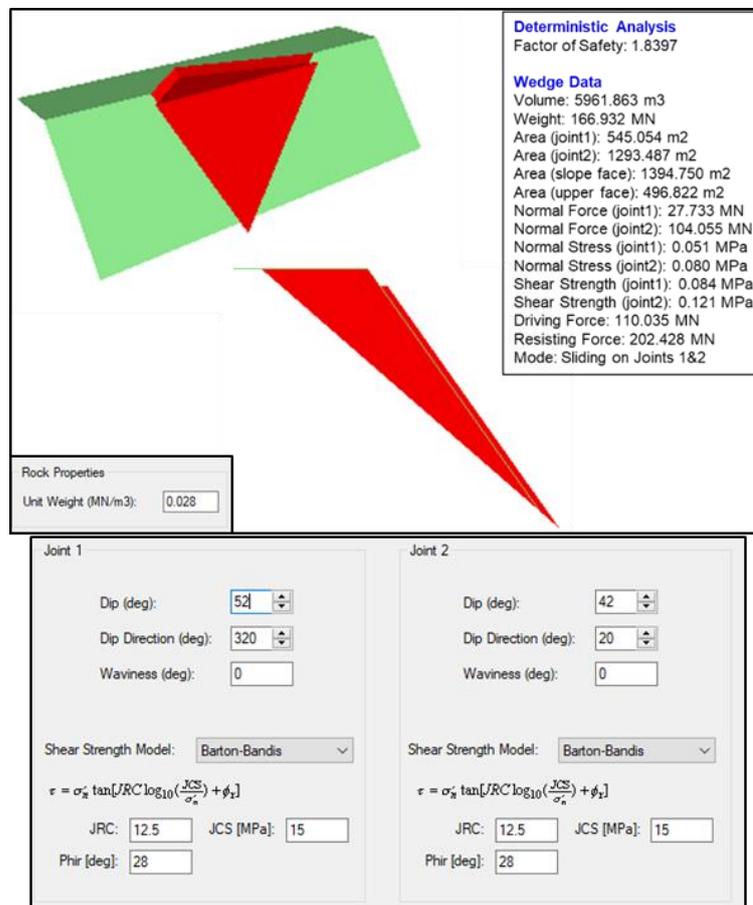


Figura 4. Exemplo de uma análise de estabilidade por equilíbrio limite utilizando o software SWEDGE, com *inputs* dos parâmetros de resistência de Barton & Bandis (1982) da descontinuidade.

Em um primeiro momento foram verificados os fatores de segurança para a análise de ruptura em cunha para o filito, avaliando-se a geometria de talude em nível de bancada com 60° e 70° de ângulo de face. A

Tabela 1 exprime os resultados destas análises.

A inserção da água nas simulações foi feita utilizando o modelo de “% Filled Fissures” com 100% de preenchimento, entendendo-se que a coluna de água gerada pelo empoçamento na

rampa acima da cunha rompida saturou ou preencheu completamente as paredes das descontinuidades anteriormente ao evento de ruptura.

Tabela 1. Fatores de segurança para análise de ruptura em cunha considerando a geometria de talude de bancada.

Material	Altura da Bancada (m)	Ângulo de Face (°)	Condição de água nas descontinuidades	Fator de Segurança
Filito	24	60	Seco	1.90
		70		1.78
		60	Saturado	<1.00
		70		<1.00

Nota-se que os fatores de segurança considerando o cenário seco são bem acima daqueles preconizados e recomendados para taludes de cavas a céu aberto ( $FS \geq 1,1$ ) por autores como Read & Stacey (2009) no livro *Guidelines for Open Pit Slope Design*. No entanto, quando se supõe que a água esteja preenchendo estas estruturas e formando uma coluna de água, os fatores de segurança reduzem bruscamente indicando a iminência de ruptura.

Diante disso, as análises mostram que a estabilidade dos taludes é altamente sensível à presença de água confinada nas paredes das fraturas. Possivelmente a água acumulada na rampa acima da ruptura apresenta-se em comunicação com as descontinuidades envolvidas na cunha mobilizada, gerando uma coluna d'água e conseqüentemente uma carga hidráulica. Essa carga exerceu uma pressão no sentido oposto às paredes das descontinuidades, ou seja, no sentido externo ao corte do talude como uma força sollicitante superior às forças resistivas do maciço, conforme ilustrado na Figura 5.

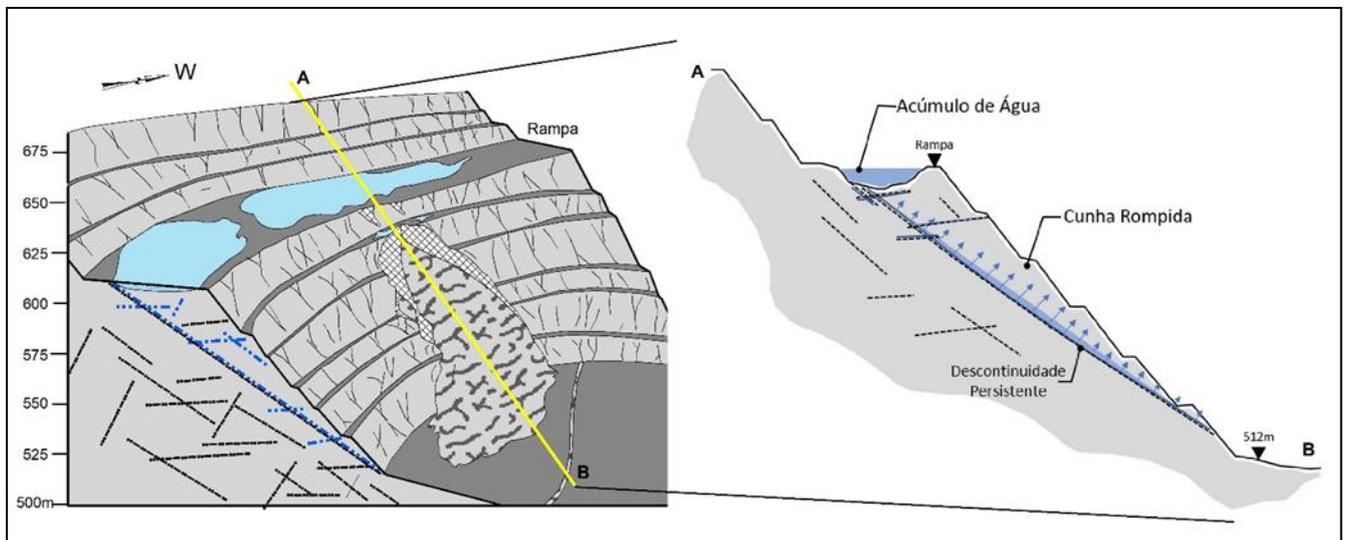


Figura 5. Perfil esquemático mostrando a condição da água empoeçada na rampa com saturação total das descontinuidades.

#### 4.2. CASO 2

O segundo estudo de caso refere-se a uma ruptura ocorrida em taludes a céu aberto em uma mina de cobre, englobando cerca de três bancadas e resultando em aproximadamente 33 m de altura. O litotipo envolvido trata-se de anfibólio xistos (ANX) e biotita xistos (BTOF) em maciços rochosos brandos a medianamente resistentes intensamente fraturados, de classe geomecânica muito pobre a pobre (classes geomecânicas V e IV).

Analogamente ao caso 1, a ruptura se deu por mecanismo estruturalmente controlado. A geometria da ruptura foi definida principalmente pela presença do plano persistente da foliação principal, com mergulho médio de  $30^\circ$ , paralelo à direção de mergulho do talude. Outras estruturas também tiveram um papel importante neste evento, como falhas persistentes de espessura centimétrica a métrica, ortogonais ao talude, bem como juntas de tração subverticais, que atuaram como limitadores da geometria, liberando os blocos rompidos. Além das condições geológico-estruturais supracitadas, nas condições de contorno do maciço rochoso onde ocorreu a ruptura consta uma pilha de estéril imediatamente a montante da crista do talude da cava.

A presença de água nas discontinuidades do maciço rochoso foi identificada em vistoria de campo e em fotografias por drone (Figura 6). Verificou-se que a causa da percolação d'água nas discontinuidades do maciço rochoso resultou de três fontes principais. A primeira, bermas com empoçamento de água, a segunda, influxo de água da drenagem da pilha de estéril à montante que infiltra no contato pilha-macício, e a terceira, de drenagem superficial provisória direcionada da pilha para a crista do talude.

Outro fator identificado foi o excesso de danos no maciço rochoso, resultantes do desmonte de rocha. Em geral o maciço rochoso encontrava-se bastante danificado com fraturas abertas, excesso blocos soltos na face dos taludes e escombros acumulados nas bermas.

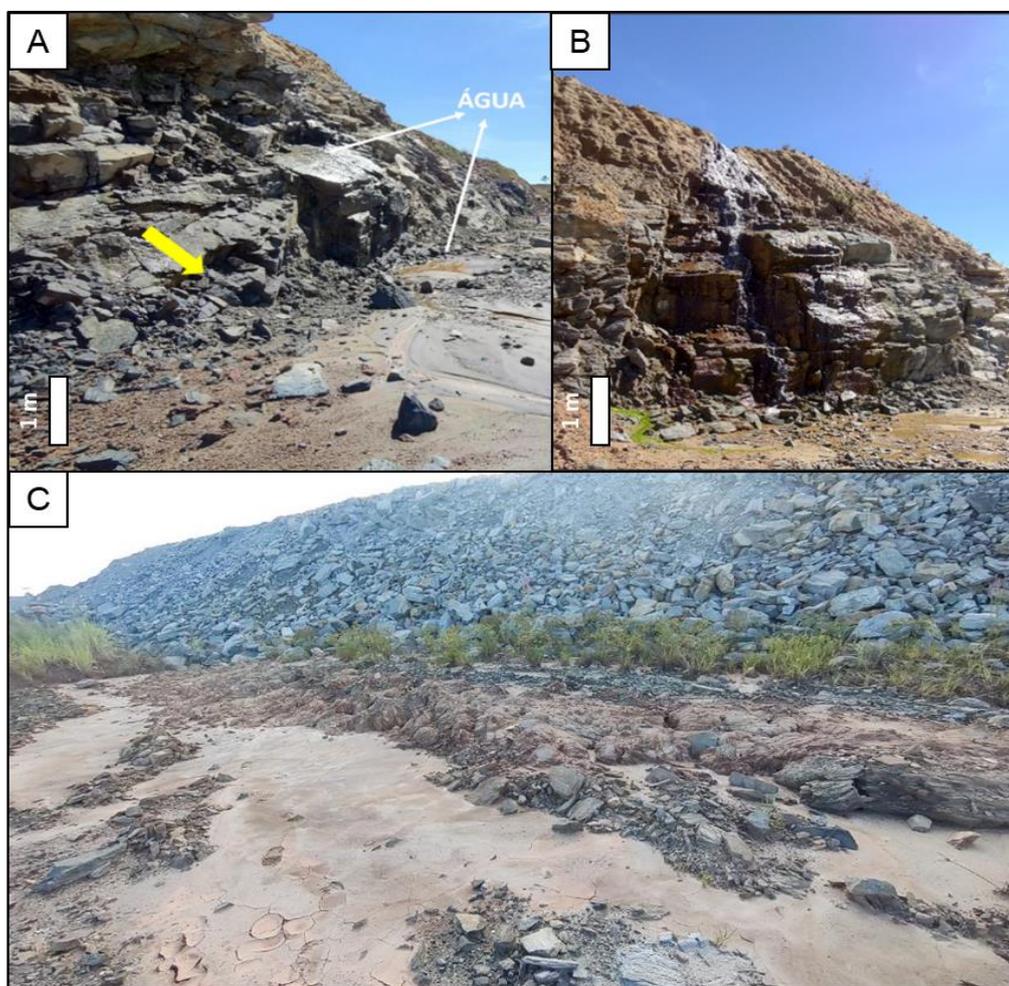


Figura 6. A) Surgência de água através de discontinuidade; B) Fluxo intenso de água advindo do contato entre pilha de estéril e terreno natural. C) Acúmulo de lama na bermas superior do talude, logo no contato com a pilha, indicando passagem de água pelo local.

Com relação ao contexto cinemático da ruptura ocorrida, a instabilização do maciço rochoso se deu por um mecanismo estruturalmente controlado de caráter misto, influenciado pela foliação, planos de falha laterais e junta de tração. Interpreta-se que o plano persistente da foliação principal, com mergulho a favor da inclinação do talude tenha agido como plano de deslizamento

principal, enquanto os planos de junta de tração a montante e os planos de falha laterais ao bloco deslocado tenham atuado como planos de delimitação e liberação da massa movimentada. A água, preenchendo as descontinuidades, exerce uma pressão no sentido oposto às paredes das descontinuidades, reduzindo o atrito das paredes a zero, deflagrando a movimentação de massa. Na Figura 7 exemplifica-se as condições de ruptura ocorrida.

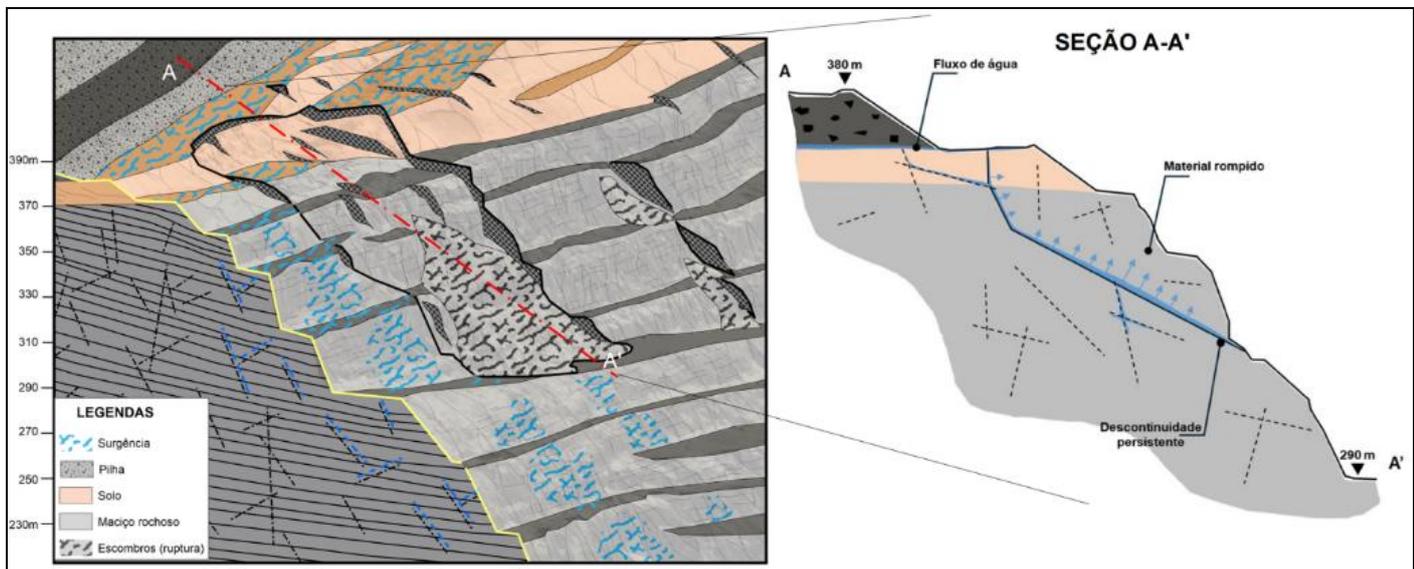


Figura 7. Perfil esquemático mostrando a condição de percolação de água antrópica a partir das descontinuidades existentes.

Diferentes simulações comporam a retroanálise elaborada para o contexto estudado, com o objetivo de testar e reconstituir as condições de ruptura da forma mais aproximada ao ocorrido, além de verificar as influências dos fatores condicionantes à estabilidade do maciço. Para tal, utilizou-se o software *Slide2*, executando-se análises de estabilidade por equilíbrio limite, considerando o efeito da foliação (anisotropia) nos materiais ANX e BTOF classe IV. Para tanto, utilizou-se o modelo de resistência anisotrópico *Generalized Anisotropic (GA)*. Esse modelo cria um material composto por um critério de resistência dentro de uma faixa de valores da anisotropia e outro material com outro critério de resistência fora dessa faixa. Para essa análise considerou-se uma faixa de valores do ângulo de anisotropia entre  $25^\circ$  e  $30^\circ$ , compatível com a análise dos dados de foliação e na verificação de campo. Dentro dessa faixa, ou seja, paralelo à foliação, foi considerado o critério de resistência de Barton & Bandis (1982) e fora da faixa de anisotropia foi considerado o critério de resistência de Hoek-Brown (2002). A definição dos parâmetros de JRC e do ângulo de atrito básico utilizados no critério de Barton & Bandis (1982) foi obtida a partir da experiência da equipe em projetos anteriores, e, para o JCS utilizou-se 50% do valor do UCS de cada material.

Outro ponto a ser levado em consideração quando são avaliadas análises de estabilidade é a identificação de forças de alívio de tensão nos materiais envolvidos. Para compensar as forças de tensão negativas é recomendado que se faça o uso de outra ferramenta denominada *tension cracks*, que insere juntas de tração na seção de análise. Por fim, para completar a retroanálise, adicionou-se um nível de água (N.A.), tal como observado em campo interpretado com um afastamento médio de 1 m da face do talude, possuindo uma distância menor em locais que foram identificadas surgências e pontos de umidade na face dos taludes, já que não existem informações precisas e de instrumentação desse parâmetro na área de trabalho.

Assim, conforme exibido na Figura 8, observa-se que o resultado da análise de estabilidade para a seção de retroanálise considerando a presença de água atinge um fator de segurança abaixo de 1,00, comprovando a ruptura.

De maneira a determinar o parâmetro ou os parâmetros mais sensíveis que impactam em maior grau o fator de segurança, foi executada uma análise de sensibilidade na seção da retroanálise. Essa análise foi realizada para seção em condição seca, e foram avaliados os parâmetros dos materiais diretamente impactados na ruptura, sendo o material classe V, ANX IV e BTOF IV.

Na Figura 9 é exibido o resultado dessa análise de sensibilidade dos parâmetros onde é possível observar que o JRC e ângulo de atrito do material ANX IV são aqueles que apresentam maiores influências no cálculo do fator de segurança.

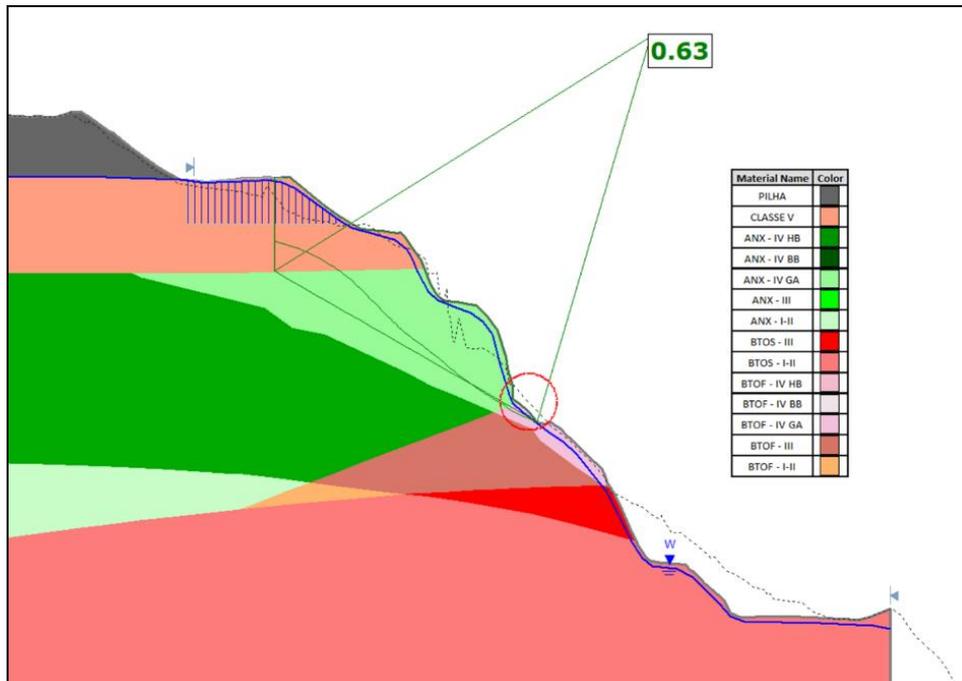


Figura 8. Análise de estabilidade considerando ANV IV e BTOF IV como materiais anisotrópicos, com aplicação da trinca de tração e com nível de água, indicando condição de ruptura existente.

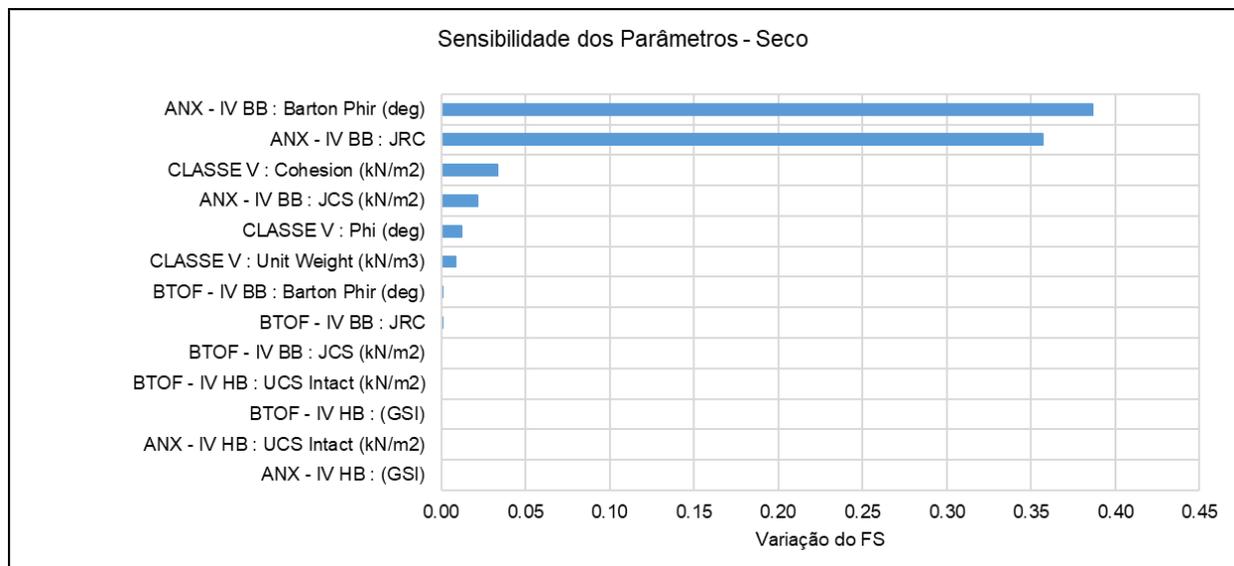


Figura 9. Resultado das análises de sensibilidade dos parâmetros da seção de retroanálise para os materiais classe V, ANX IV e BTOF IV.

No contexto apresentado, de forma similar ao caso 1, a poropressão gerada pela água acumulada nas fraturas abertas do maciço rochoso tem influência direta no fator de segurança. A coluna d'água que percola nas paredes das discontinuidades exerce uma força de empuxo contrário às paredes, reduzindo a resistência do material ao cisalhamento, e, portanto, seu ângulo de atrito residual, o que resulta na instabilização e movimentação da massa rochosa fraturada.

## 5. CONCLUSÕES

As análises conduzidas para ambos os estudos de caso mostram que a estabilidade dos taludes é altamente sensível à presença de água confinada nas paredes das descontinuidades. Essa água pode ter origem tanto subterrânea (natural) quanto antrópica, com fluxo não controlado. Além desse fator, outros influenciam a estabilidade, como descontinuidades que formam arranjos cinematicamente desfavoráveis, presença de material de classe geomecânica de baixa qualidade e alto grau de fraturamento, ou de boa qualidade, mas com descontinuidades abertas ou danificadas por desmonte inadequado e, por fim, geometrias de taludes incompatíveis com a capacidade de sustentação do talude (paredes muito inclinadas, bermas reduzidas). Com relação ao efeito da saturação de água em descontinuidades e sua contribuição para a ruptura de taludes rochosos, tem-se que a água desempenha um papel fundamental no processo de instabilização de taludes rochosos, atuando de diferentes maneiras:

- A presença prolongada de água nas descontinuidades favorece o intemperismo químico e físico das superfícies, promovendo a alteração mineralógica e a degradação dos materiais de preenchimento, o que reduz a resistência ao cisalhamento ao longo dos planos de fraqueza.
- A infiltração de água pode aumentar a pressão intersticial nos poros da rocha intacta e nas fraturas, gerando uma poropressão que reduz o contato efetivo entre os blocos rochosos e diminui a coesão e o atrito ao longo das descontinuidades (como indicado na análise de sensibilidade do caso 2, o ângulo de atrito influencia diretamente a condição de estabilidade do maciço rochoso).

Assim, a interação entre intemperismo e pressurização da água nos planos de fraqueza constitui um fator crítico para a estabilidade dos taludes rochosos, exigindo um cuidado imprescindível com relação à gestão das drenagens superficiais nos complexos de mineração, que, se malconduzido, pode atuar como gatilho para rupturas. Dessa forma, destaca-se a necessidade de implantação de um sistema de drenagem superficial eficiente em taludes de mineração para evitar acúmulo de água nas bermas e infiltração através das descontinuidades abertas.

Nesse sentido, também é válido observar a importância de execução de desmonte de rochas cuidadoso, considerando-se eventual execução de pré-cortes e malhas de desmonte que visem menor impacto ao maciço rochoso, contribuindo para preservação do talude remanescente e para manutenção das descontinuidades fechadas.

## REFERÊNCIAS

BARTON, N.; BANDIS, S. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. In: PROCEEDINGS OF THE 23rd US SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 1982. Keynote lecture. p. 739–760.

GOODMAN, R. E. Introduction to rock mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1989.

HOEK, E.; BRAY, J. W. Rock Slope Engineering. 3. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.

HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.; CORKUM, B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. In: NARMS-TAC CONFERENCE, 1., Toronto, 2002. Proceedings [...]. Toronto: [s.n.], 2002. v. 1, p. 267–273.

PALMSTRØM, A. Rmi – A Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purposes. 1995. Tese (Doutorado) – University of Oslo, Oslo, 1995.

READ, J.; STACEY, P. Guidelines for open pit slope design. Ed. John Read & Peter Stacey. Leiden: CRC Press/Balkema, 2009.