

Análise de Estabilidade em Pilha Pulmão no Processo de Basculamento de ROM

André Gonçalves Azevedo

Engenheiro Geotécnico, VALE SA, Santa Bárbara-MG, Brasil, andre56goncalves@gmail.com

Anderson Gonçalves de Azevedo

Engenheiro Geotécnico, Samarco, Santa Bárbara-MG, anderson95azevedo@gmail.com

Thainá Suzanne Alves Souza

Coordenadora de Geotecnia, VALE SA, João Monlevade-MG, Brasil, thainasas@yahoo.com.br

Tiago Pereira da Silva

Técnico de Geotecnia, VALE SA, Santa Bárbara-MG, Brasil, tiagopereira96@outlook.com.br

Luis Henrique Lopes Assis

Engenheiro Geotécnico, VALE SA, Rio Piracicaba-MG, Brasil, luislopesassis@gmail.com

RESUMO: O desafio de garantir a segurança geotécnica nas atividades unitárias de basculamento é imprescindível para continuidade das operações e serviu de inspiração para realização desse trabalho. Esse teve o objetivo de verificar, utilizando o software Slide2 da Rocscience, o fator de segurança de uma pilha pulmão e a distância segura para as operações de descarregamento de minério bruto (ROM) com caminhões basculantes CAT793F na Mina de Brucutu considerando a dinâmica de cargas para diferentes distâncias de basculamento da crista de talude com dez metros de altura. De posse das distribuições de carga no solo, foi realizada análise de estabilidade, adotando o método de equilíbrio limite sugerido por Morgenstern-Price e análise probabilística considerando a variabilidade do material e a sensibilidade das simulações. Uma vez realizadas as análises, foi constatado o atendimento aos critérios normativos para a distância de basculamento de nove metros e considerando os critérios de aceitabilidade propostos por Hawley e Cunning (2017) uma distância de cinco metros da crista, resultados para probabilidade de falha calculada inferior a 15%, consequência baixa e confiança moderada atrelada à estrutura. A avaliação desenvolvida mostrou a possibilidade de ganho de produtividade na operação de basculamento por se tratar de uma atividade temporária com equipamentos não tripulados. A replicação dos resultados obtidos remete a uma validação das premissas adotadas a fim de certificar que essas se apliquem ao contexto sugerido.

PALAVRAS-CHAVE: Dinâmica de carga, distância de basculamento, segurança geotécnica, pilha pulmão.

ABSTRACT: The challenge of ensuring geotechnical safety in individual dumping activities is essential for the continuity of operations and served as inspiration for this work. The objective was to verify, using Rocscience's Slide2 software, the safety factor for a stockpile and the safe distance for unloading Run of Mine (ROM) with CAT793F dump trucks in iron quadrilateral mining, considering load dynamics for different dumping distances from a 10-meter-high slope crest. Based on soil load distributions, stability analysis was performed, adopting the limit equilibrium method suggested by Morgenstern-Price, along with probabilistic analysis considering material variability and simulation sensitivity. Once the analyses were conducted, compliance with regulatory criteria was confirmed for a dumping distance of nine meters and considering acceptability criteria proposed by Hawley and Cunning (2017), a five-meter distance from the crest resulted in a calculated failure probability below 15%, low consequences, and moderate confidence associated with the structure. The assessment demonstrated the potential productivity gain in dumping operations due to their

temporary nature and use of unmanned equipment. Replicating the obtained results validates the adopted assumptions to ensure their applicability in the suggested context.

KEYWORDS: Load dynamics, dumping distance, geotechnical safety, stockpile.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade da pilha pulmão durante o basculamento é substancial para garantir a continuidade das operações de basculamento na mina. Métodos determinísticos tradicionais, que utilizam parâmetros obtidos em ensaios de laboratório, são comumente empregados para analisar a estabilidade dos taludes. Segundo Dias (2021), devido à diversidade de litologias e propriedades geotécnicas dos materiais lavrados, uma avaliação puramente determinística pode não ser suficiente para garantir a estabilidade de uma pilha pulmão. Nesse contexto, a análise probabilística surge como uma ferramenta adicional para lidar com as incertezas nas variáveis geotécnicas, correlacionando funções de probabilidade a parâmetros como peso específico, intercepto coesivo e ângulo de atrito para determinar uma probabilidade de falha (PF) e um fator de segurança (FS).

Com a crescente preocupação com a segurança no ambiente de trabalho e os questionamentos sobre a operação de descarregamento, compreender a dinâmica de cargas dos caminhões basculantes e propor soluções determinísticas e estatísticas torna-se crucial para controlar e garantir a confiabilidade das operações de lavra. Este estudo foi inspirado na necessidade de certificar a segurança geotécnica nas operações de descarregamento de minério *Run of Mine* (ROM) com caminhões fora de estrada na pilha pulmão da Mina de Brucutu. Vale ressaltar que este estudo não está relacionado a incidentes passados, mas sim à gestão de mudanças na atividade de basculamento na referida mina.

A estabilidade de uma pilha pode ser avaliada utilizando métodos determinísticos, como na teoria do equilíbrio limite pelo método das fatias, que consiste na divisão da superfície potencial de ruptura em fatias para análise individual, aplicando equações de equilíbrio de forças e momentos (Fabrício, 2006). O fator de segurança, que é a razão entre as componentes resistentes e mobilizadoras, deve ser maior que 1 para indicar estabilidade.

A norma brasileira ABNT NBR 13029:2017 estabelece fatores de segurança mínimos para análise de estabilidade de pilhas de estéril.

Além de garantir a lavra adequada do minério e o desenvolvimento da mina, é essencial garantir as operações de transporte e basculamento, seja do minério e/ou do estéril.

O sistema de basculamento de caçambas pode ser realizado de três maneiras, cilindro telescópio frontal, sistema direto e sistema indireto de basculamento sendo estes dois últimos com cilindros hidráulicos de hastes simples, aplicados na parte inferior da caixa de carga da caçamba (Schulz, 2015). Cada um desses sistemas possui características específicas em termos de eficiência e custo.

Os limites de pesos para caminhões estabelecidos pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) consideram a pesagem do veículo estacionado, resultando em cargas estáticas nos eixos dianteiros e traseiros. Os catálogos de equipamento geralmente apresentam as distribuições de carga estática para veículos carregados e descarregados. Durante o basculamento, a carga sobre a caçamba varia seu centro de massa, dificultando a apresentação da taxa de carregamento sobre os eixos. Para uma análise mais detalhada da dinâmica de cargas, sugere-se o uso de sistemas de leitura integrados às suspensões. O cálculo da distribuição de carga em caminhões de dois eixos pode ser simplificado, conforme proposto por Schulz (2015), enquanto para caminhões de três eixos, recomenda-se o uso de uma viga bi apoiada para simplificar o cálculo. Para esse trabalho, foram considerados caminhões fora-de-estrada (não tripulados) de dois eixos da Caterpillar modelo 793F, com uma representação de carga assumida de 120% do peso nominal, resultando em distribuições específicas nos eixos durante o basculamento.

Identificar potenciais condições inseguras é o primeiro passo para garantir a segurança geotécnica nas atividades de pilhas. Estas incluem sobrecarga do caminhão, drenagem inadequada, avanço de disposição em regiões de fundação com declive acentuado, entre outros. A compreensão dessas condições é essencial para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e controle de riscos.

Em resumo, a avaliação da estabilidade da pilha pulmão durante o descarregamento é crucial para garantir a segurança e a eficiência das operações de lavra. Métodos determinísticos e probabilísticos podem ser empregados para analisar a estabilidade dos taludes, considerando as incertezas nas propriedades geotécnicas dos materiais lavrados. Além disso, a escolha do sistema mecânico de basculamento adequado também tem um papel fundamental na segurança e no desempenho das operações de descarregamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para distribuição de cargas no solo durante operação unitária de basculamento, foi realizado um levantamento da dinâmica de transferência de peso entre os eixos dianteiro e traseiro para obtenção da carga máxima no eixo traseiro e a equivalente do eixo dianteiro durante a elevação da caçamba de um CAT793 - peso operacional da máquina 155 toneladas e a carga útil com acréscimo de 20% na carga nominal de 276 toneladas (avaliação baseada nos resultados de transmissão de carga dos equipamento da mina). Para obtenção dessas, considerou-se a condição de que os sensores de suspensão indicassem o aumento gradual de pressão no eixo traseiro de até 120% em relação à posição inicial, angulado entre 36° e 37°. Nesse intervalo o ângulo de repouso do material é normalmente superado e o material começa a escorrer, aliviando a carga sobre o equipamento, mesmo com o implemento em movimento de elevação. Quando a balança atinge o ponto máximo de elevação, a carga já está praticamente descarregada. Adotou-se ainda que, a carga medida no eixo dianteiro era distribuída igualmente entre os pneus dianteiros com uma área de contato com o solo de cerca de dois metros quadrados e que a carga medida no eixo traseiro era distribuída igualmente entre os pneus traseiros com uma área de contato com o solo de cerca de quatro metros quadrados.

De posse da distribuição de carga no solo, foi realizada análise de estabilidade, adotando o método de equilíbrio limite na técnica de Morgenstern-Price (1965) e análise probabilística considerando as simulações de Monte-Carlo para diferentes distâncias de basculamento através do software Slide 2D. Oliveira (2020) relata que o método de Morgenstern-Price (1965) considera o equilíbrio de forças horizontais (E) e forças verticais (X), bem como o equilíbrio de momentos, de tal forma que a direção da resultante das forças entre as lamelas seja definida por uma função arbitrada que satisfaça o equilíbrio de forças e momentos. A Figura 1 traz o desenho esquemático da distribuição de esforços atuantes na lamela e a Tabela 1 resume as considerações referentes ao equilíbrio de forças e momentos.

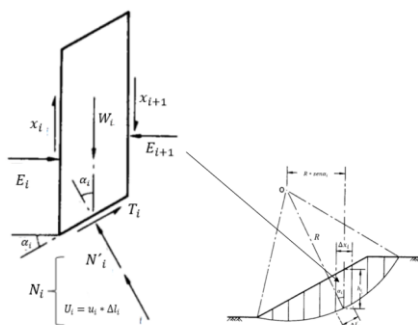


Figura 1. Divisão da fatia e esforços atuantes (modificado TELLES, 2015)

Tabela 1. Métodos de equilíbrio limite (modificado ABRAMSON, 2002).

Método	Equilíbrio de forças		Equilíbrio de momentos
	E	X	
Morgenstern-Price GLE (1965)	Sim	Sim	Sim

O fator de segurança sugerido pela ABNT NBR 13029:2017 para pilhas de estéril é de 1,5 para análise de estabilidade considerando superfície freática normal e 1,3 superfície freática crítica - local e global. Foi avaliado também o critério de aceitabilidade sugerido por Hawley e Cuning (2017) para pilhas de estéril e de

produto como comparativo dos resultados obtidos pela análise probabilística. Para esse, considerou-se o alcance da massa rompida de forma conservadora igual à altura do talude (10 metros) para avaliar a consequência, bem como a ausência de acessos/estruturas civis ao pé da pilha e base de dados a nível de pré- viabilidade de projeto. No que se refere a análise probabilística foram utilizados os valores de referência para parâmetros de variabilidade conforme sugerido por Rezende (2013).

Tabela 2. Coeficiente de variação para os principais parâmetros geotécnicos (SANDRONI E SAYÃO,1992, apud REZENDE, 2013)

Parâmetros	Valor recomendado (%)	Coefficiente de variação (%)
Peso específico	3	02 a 08
Coesão efetiva	40	20 a 80
Ângulo efetivo de resistência	10	04 a 20
Coesão não drenada	30	20 a 50

É válido destacar que os critérios de aceitabilidade devem levar em conta não apenas a confiabilidade dos parâmetros e a probabilidade de falha, mas também as consequências envolvidas em cada problemática. A probabilidade de falha e consequências associadas estão diretamente relacionadas ao conceito de risco. Nesse sentido, foram utilizados os critérios de aceitabilidade sugeridos por Hawley e Cuning (2017) baseado em confiança, consequência e valores de fator de segurança (FS) e probabilidade de falha (PF).

Tabela 3. Critério de aceitabilidade para análise de estabilidade estática em pilhas de estéril e produto (modificado de HAWLEY E CUNNING, 2017)

Consequência	Confiança	FS Mínimo	Máxima PF
Baixa	Baixa	1,3-1,4	10-15%
	Moderada	1,2-1,3	15-25%
	Alta	1,1-1,3	25-40%
Moderada	Baixa	1,4-1,5	2,5-5%
	Moderada	1,3-1,4	5-10%
	Alta	1,2-1,3	10-15%
Alta	Baixa	>1,5	<1%
	Moderada	1,4-1,5	1-2,5%
	Alta	1,3-1,4	2,5-5%

Além disso, considerou-se isotropia e homogeneidade dos materiais que compõem o talude, fundação da pilha composta por itabiritos friáveis, intercepto coesivo nulo e valores médios de peso específico 26,6kN/m³ e de ângulo de atrito 36°, influência da sobrecarga dos caminhões (fora de estrada) na estabilidade dos taludes, em função das distancias (D) da crista e altura do banco (H), através do software Slide2, critério de ruptura de Mohr-Coulomb, teoria do equilíbrio limite para o Método de Morgenstern-Price, carga de 343 toneladas-força no eixo traseiro e 97 toneladas-força eixo dianteiro no ápice da dinâmica de basculamento, área de contato efetivo dos pneus com o solo de cerca de 2 m² para o eixo dianteiro e 4m² para o eixo traseiro, talude de 10 metros de altura, não levando em consideração a existência de material na praça do nível inferior, as distâncias de basculamento da crista variando de 3 a 10 metros, não foi considerado nível piezométrico na análise de estabilidade em concordância as respostas dos instrumentos instalados na localidade, nem considerados efeitos de capilaridade e infiltração.

A Figura 2 traz a seqüência de operações unitária da extração do minério até o basculamento e a Figura 3 os resultados de pressão obtidos para diferentes angulações da báscula no momento de descarregamento do ROM:

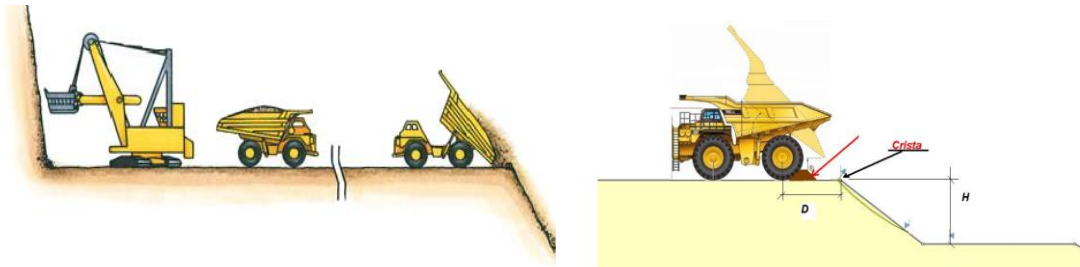


Figura 2. Operações unitárias de carregamento, transporte e descarregamento (CATERPILLAR, 2006)

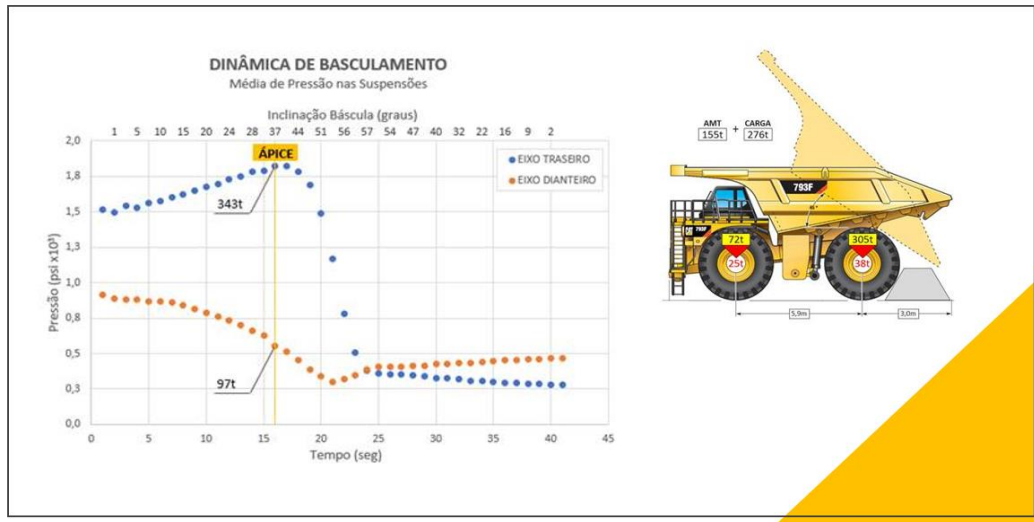


Figura 3. Verificações de peso e carga CAT 793F (Fonte: Autor)

Para análise probabilística, adotou-se função de distribuição normal de probabilidade (confiança de 95%) e medidas de localização (média) do peso específico $26,6\text{kN/m}^3$ e do ângulo de atrito 36° e intercepto coesivo nulo. Para medidas de variabilidade considerou-se desvio-padrão de $0,8\text{kN/m}^3$ para o peso específico e de $3,6^\circ$ para o ângulo de atrito conforme sugerido por Rezende (2013) na ausência de espaço amostral significativo.

3 RESULTADOS

Com base na dinâmica de distribuição de cargas entre os eixos (dianteiros e traseiros) e área de contato efetivo dos pneus foi obtida uma pressão no solo de $475,59\text{kN/m}^2$ no eixo dianteiro e $840,86\text{kN/m}^2$ no eixo traseiro.

A Tabela 4 traz o resumo dos resultados de probabilidade de falha e índice de confiabilidade obtidos através das simulações numéricas e o fator de segurança calculado (Slide2 da Rocscience) para as diferentes distâncias de basculamento na pilha pulmão.

Tabela 4. Fator de Segurança, probabilidade de falha e índice de confiabilidade (RI) para diferentes distâncias de basculamento

Distância de basculamento (m)	FS	PF (%)	RI
3	1,0	47,3	0,1116
4	1,1	24,2	0,7310
5	1,2	11,6	1,1567
6	1,2	6	1,4494
7	1,3	3,1	1,8553
8	1,4	1,3	2,1598
9	1,5	0,7	2,4355
10	1,6	0,4	2,6704

A Figura 4 traz os resultados da análise de estabilidade em condição drenada e a análise probabilística considerando basculamento a 09 metros da crista da pilha pulmão:

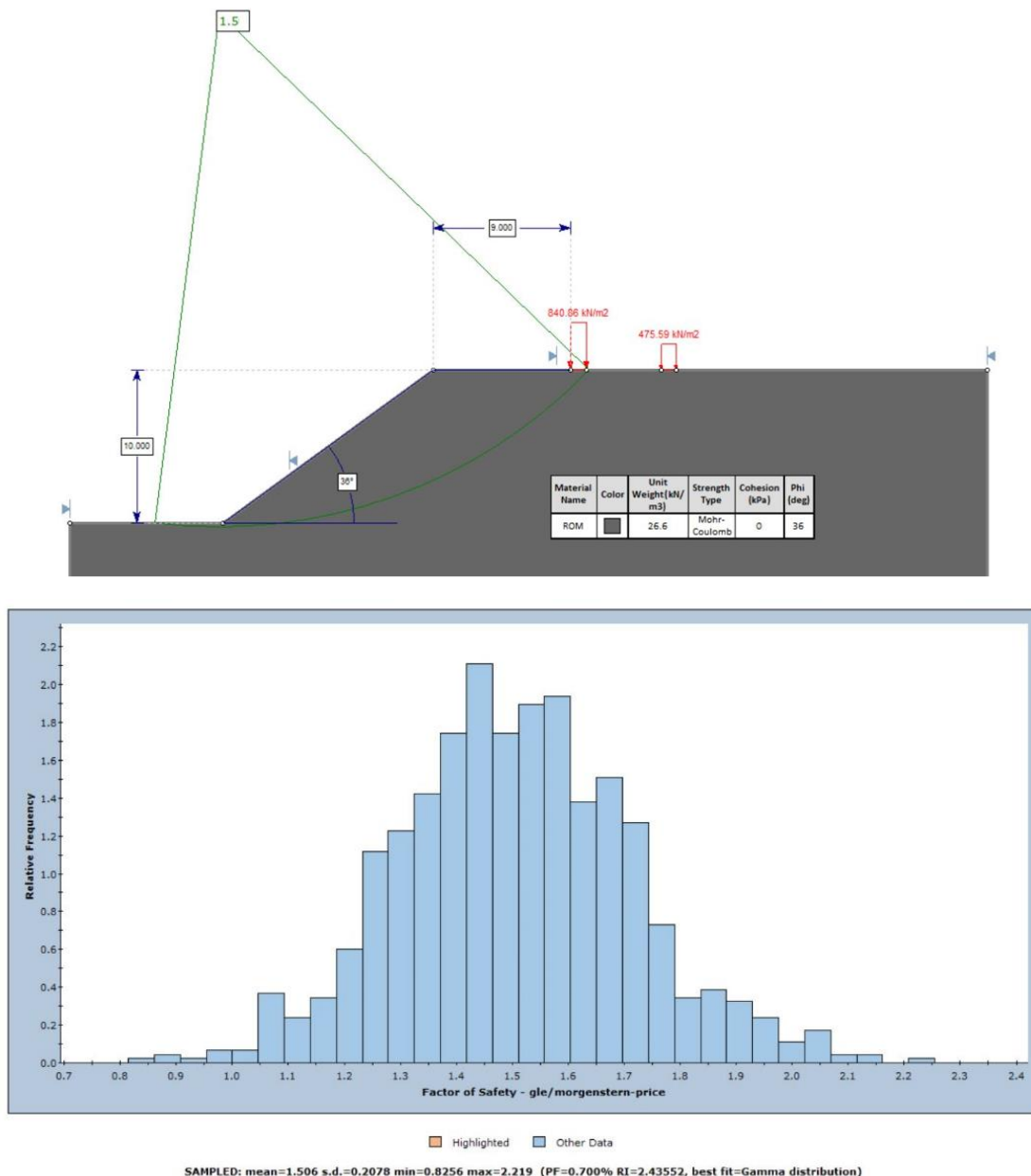


Figura 4. Análise determinística e probabilística considerando basculamento a 09 metros da crista

Diante dos resultados exibidos na Tabela 4, tem-se que para distância de basculamento inferior a 09 metros da crista da pilha pulmão o FS de segurança não atenderia as orientações sugeridas pela ABNT NBR 13029:2017.

Os resultados encontrados da análise probabilística (Slide2D) para critérios definidos por Hawley e Cunnig (2017) para as características da pilha pulmão estudada, assumindo as premissas de confiança moderada, consequência baixa, FS 1,2-1,3 e PF 15-25% (Tabela 2), sugerem uma distância mínima de basculamento não inferior a cinco metros da crista. Ao passo que, para fatores de segurança superiores a 1,5 (distância de basculamento de 09 metros da crista) a probabilidade de falha relacionada é inferior a 1%. Cabe destacar que, dentro de visão de risco associado, esses resultados devem ser amplamente discutidos impactos sociais, ambientais, entre outros. Além disso, é importante ressaltar que o estudo é direcionado a operações não tripuladas.

4 CONCLUSÕES

Como parte desse trabalho, calculou-se os fatores de segurança para diferentes distâncias de basculamentos a fim de determinar a estabilidade geotécnica da pilha pulmão da Mina de Brucutu. Dos resultados obtidos, concluiu-se que para atendimento a ABNT NBR 13029 : 2017, cuja diretriz sugere fator de segurança mínimo de 1,5, a distância de basculamento deve ser superior a nove metros da crista do talude.

Os resultados encontrados através da análise probabilística e aplicados aos critérios de Hawley e Cunnig (2017) apresentam a possibilidade de redução da distância mínima de basculamento para cinco metros, devendo a aplicação dessa distância ser discutida em um contexto mais amplo que considere o cenário atual de risco de falha da estrutura. É oportuno enfatizar que a operação de caminhões analisados é completamente de forma não tripulada.

Outros fatores externos podem influenciar na análise de estabilidade e as condições de campo devem sempre serem certificadas. Dentre esses fatores, pode-se citar a falta de manutenções e drenagem irregular da praça de basculamento, rupturas pontuais, processos erosivos e geometria inadequada como principais pontos de atenção. Nesse sentido, indica-se manter o caimento da drenagem no sentido contrário a face do talude, avaliar periodicamente as condições de trafegabilidade do local, realizar inspeções visuais periódicas por profissionais treinados, integrar a estrutura ao plano de preparação do período chuvoso da mina, entre outros.

Para trabalhos futuros, recomenda-se estudos complementares tais como: influência de infiltração (precipitação local) na estabilidade, influência de escoamento superficial na integridade do talude (erodibilidade do material), efeitos de capilaridade, sismicidade, estudo de comportamento de solos não saturados e operação assistida a fim de certificar a abrangência do trabalho.

A replicação desses resultados remete a uma validação das premissas adotadas a fim de garantir que essas se apliquem ao novo contexto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMSON, L. Slope Stability and Stabilization Methods. John Wiley & Sons, Hoboken. Strength of rock and rock masses. ISRM New Journal. California, 2002.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 13029: Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril, em pilha, em mineração. Rio de Janeiro, 2017.
- CATERPILLAR. Reference Guide to Surface Mining Applications. Illinois, USA. 2006.
- DIAS, F. B. Avaliação de Estabilidade de Uma Barragem Alteada Pelo Método de Montante Por Diferentes Metodologias de Cálculo de Fator de Segurança: Comparação Determinística. Trabalho Final de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2021.
- FABRÍCIO, J. V. F. Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contenções. PUC Rio. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro. 2006.

- HAWLEY M.; CUNNING J. Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design Monitoring Dam Performance. United Kingdom, 2017.
- MORGENSTERN, N. R., & PRICE, V. E. The Analysis of Stability of General Slip Surfaces. Géotechnique. London, 1965. v.15. p:79.
- OLIVEIRA, D. M. A. Análise de Estabilidade Tridimensional e Estudo de Sensibilidade dos Parâmetros Condicionantes da Ruptura de Um Talude de Cava. Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto, 2020.
- REZENDE, D. A. D. Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes em Barragens de Rejeito. Trabalho de Conclusão de Curso – UFRJ. Rio de Janeiro, 2013. p, 108.
- SCHULZ, F. J. Análise e Projeto de Sistema de Acionamento para Caçamba Basculante. Universidade Federal de Uberlândia. Dissertação. Uberlândia, 2015.
- TELLES, A. C. D. M. Análise de Estabilidade de um Talude Rompido na Rodovia RJ 130, Teresópolis, RJ. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.