

Análise de Estabilidade para Redução do Diâmetro de Tirantes em Mina Subterrânea.

João Pedro Barbosa Amaral

Engenheiro Geotécnico, Nexa Resources, Aripuanã, Brasil, joao.amaral@nexaresources.com

Michel Melo Oliveira

Professor, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, michelmelo@demin.ufmg.br

André Luis Ferreira

Supervisor, Nexa Resources, Aripuanã, Brasil, andre.ferreira@nexaresources.com

Philippe Resende

Engenheiro Geotécnico, Nexa Resources, Aripuanã, Brasil, philippe.resende@nexaresources.com

RESUMO: Na mineração subterrânea, os sistemas de estabilização são usados como forma de garantir a estabilidade, permitindo o avanço das escavações de forma segura. Na mina de Aripuanã, localizada no Mato Grosso – Brasil, os tirantes preenchidos com resina representam o reforço principal. Apesar da eficiência desse suporte, existe um custo expressivo para o empreendimento na aquisição dessas barras. Uma maneira de reduzir esse valor é diminuir as dimensões do tirante. Estima-se que a redução do diâmetro de 22 mm para 19 mm promove uma economia para a empresa de 15 a 20% na compra dessas barras. De modo a conciliar o ganho financeiro para o empreendimento e o nível de segurança exigido, o presente trabalho objetiva, usando o método de equilíbrio limite, avaliar a estabilidade das escavações com os tirantes de diâmetro menor e capacidade a tração reduzida de 25 t para 18.9 t. Parâmetros importantes para as análises foram coletados previamente: resistência de aderência do atirantamento (t/m), aplicando a metodologia SEPT (*Shot Encapsulation Pull Test*) em 36 testes de arranque, e zona de dano do maciço rochoso (m), obtida com filmagens de furos com microcâmera. Os parâmetros foram utilizados na análise cinemática por cunhas tetraédricas. Os resultados apontaram estabilidade para a maioria dos casos. O trabalho ainda investiga o impacto de desvios operacionais nos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: tirantes, diâmetro, ganho financeiro, método de equilíbrio limite, estabilidade em galerias, desvios operacionais.

ABSTRACT: In underground mining, support systems are applied to promote the stability, enabling the safe advancement of excavations. The Aripuanã mine in Mato Grosso, Brazil, the resin-filled rock bolts represent the primary reinforcement for ongoing excavations. Despite their effectiveness, there is a significant cost associated with acquiring these bars. One approach to reduce this expense is by reducing the bolt dimensions. It is estimated that reducing the diameter from 22 mm to 19 mm would result in a cost-saving from 15 to 20 % associated with bolts purchase. In order to achieve the financial gains and maintain the required safety level, this study uses the limit equilibrium method to assess the stability of galleries with smaller diameter bolts and reduced tensile capacity from 25t to 18.9 t. Prior to apply these techniques, crucial parameters such as bond strength (t/m) and damage zone (m), were determined by 36 pull-out tests according to SEPT (Shot Encapsulation Pull Test) methodology and borehole filming, respectively. These parameters were inputted in tetrahedral wedges analysis. The results indicated stability conditions in majority. Additionally, this study investigates the impact of operational deviations on results.

KEYWORDS: rock bolts, diameter, financial gains, limit equilibrium method, stability of galleries, operational deviations.

1 INTRODUÇÃO

Para abertura de escavações em mina subterrânea geralmente são usados sistemas para estabilização do maciço rochoso podendo ser classificados quanto à tipo, estágio de aplicação e funcionamento. Esses sistemas são dimensionados de acordo com as características da escavação (tamanho e tempo de utilização) bem como a propriedades locais do maciço rochoso.

Quando se trata de galerias em desenvolvimento na mineração brasileira, o uso de contenções mecânicas e passivas tem perdido espaço para o uso de reforços ativos como tirantes protendidos. Essa substituição está atrelada ao aumento de vida útil das minas, o que requer sistemas permanentes.

Atualmente nas minas de Aripuanã são utilizados tirantes preenchidos com resina como reforço, primário e ativo bem como concreto projetado como retenção, secundária, passiva.

Os tirantes são ovalizados e tem comprimento de 2.4 m com diâmetro de 22 mm. De acordo com o principal fornecedor atual, essas barras têm resistência a tração de 25 t. Apesar da eficiência em estabilizar as galerias, existe um custo considerável associado a utilização desse tipo de contenção. Dessa forma, faz-se necessário um dimensionamento otimizado atendendo expectativas de segurança e custo para o desenvolvimento da mina.

Uma forma de reduzir o custo para o atirantamento é diminuir as dimensões da barra de aço. Estima-se que a redução do diâmetro nominal de tirantes de 22 mm para 19 mm promove uma economia de 15 a 20 %. No entanto, essas barras têm resistência a tração reduzida para 18.9 t. Assim, o presente trabalho tem o intuito de realizar a análise de estabilidade para o uso dessas barras com diâmetro inferior de maneira a alinhar a economia proposta com os padrões de segurança exigidos.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é conduzir uma análise de estabilidade para uso de tirantes com diâmetro reduzido para 19 mm na mina de Aripuanã. Para suportar a análise, primeiramente, realizou-se testes de forma a obter parâmetros importantes associados aos tirantes e maciço rochoso.

Como objetivos específicos, o trabalho apresenta: resultados de resistência de aderência dos tirantes (t/m); resultados de extensão da zona de dano do maciço rochoso (m) e resultados de análises cinemáticas por cunhas tetraedricas bem como influencia de desvios operacionais nos Fatores de Segurança (FS).

3 CONTEXTUALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Maciços rochosos e critério de ruptura

O maciço rochoso pode ser entendido como a junção entre rocha intacta, descontinuidades (plano ou região com redução significativa de resistência), estado de tensão e água (Hutchinson e Diederich, 1996).

A integridade do maciço pode ser comprometida pelos esforços em que está sendo solicitado de maneira a chegar à ruptura, que, para o contexto de engenharia, significa a perda da capacidade de desempenhar sua função. Dessa forma, criaram-se critérios baseados em funções de componentes de tensão para estudar as condições em que a rocha apresenta deformações inaceitáveis. Esses critérios estudam a ruptura que ocorre quando a tensão cisalhante (τ) é superior à resistência ao cisalhamento da rocha em um plano.

Brady e Brown (2004) investigaram como características intrínsecas as descontinuidades como rugosidade e coesão dos seus planos influenciam no comportamento cisalhante. Os autores mostram como os dentes (em microescala) das descontinuidades contribuem para variações no ângulo de fricção ϕ e surgimento de coesão para o plano.

O critério de Barton e Bandis (1982) propõe que a resistência ao cisalhamento da descontinuidade (τ) seja descrita pela Equação 1:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (1)$$

Em que: σ_n = Tensão normal; JRC = Coeficiente de rugosidade da descontinuidade; JCS = Resistência a compressão da parede da descontinuidade e ϕ_r = Ângulo de fricção residual.

3.2 Zona de dano do maciço rochoso

Um importante parâmetro para este trabalho diz respeito à quantificação da Zona de Dano no entorno da galeria após sua abertura. Esse parâmetro serve de entrada para as análises conduzidas no estudo.

De acordo com Padula (2016), a técnica de *Drill and Blasting* provoca mudanças expressivas e irreversíveis nas propriedades do maciço de 0.1 a 1.5 m nos entornos da escavação.

Sharma (2020) subdivide a zona de dano, nomeada pelo autor de EDZ (*Excavation Damage Zone*), em 4 subzonas e ilustra os possíveis efeitos no entorno da galeria na Figura 1: HDZ (*Highly Damaged Zone*); EDZci (*Construction Induced Excavation Damage Zone*), BIDZ (*Blast Induced Damage Zone*) e EDZsi (*Stress Induced Excavation Damage Zone*).

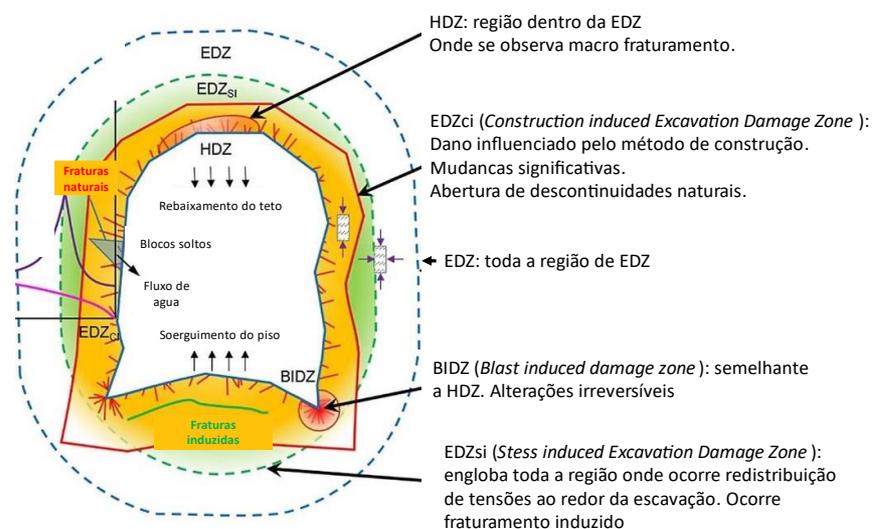


Figura 1. Regiões da EDZ e seus efeitos no entorno da galeria (adaptado de Sharma, 2020).

Para mensurar/investigar a EDZ pode se usar uma microcâmara de filmagem de furos. Utilizada por Cota (2011), a microcâmara é inserida no furo para televisionar as paredes ao longo do furo representando o interior maciço. As imagens são registradas no aparelho e podem ser analisadas em um computador.

3.3 Atirantamento em mina subterrânea

De acordo com Pereira (2018), tirantes são um grupo de barras de aço com maior alongação, desenvolvidas para absorver as deformações do maciço rochoso. Esse sistema consiste em uma barra de aço rugosa, uma placa de apoio e material ligante, podendo ser cimento ou resina.

Para funcionamento do atirantamento com coluna total e ativo, deve-se inserir um cartucho de resina pega rápida no fundo do furo com o intuito de ancorar o sistema na zona elástica do maciço rochoso, sem deformações. O restante do furo é preenchido com cartuchos de resina pega lenta. Dessa forma, ao torquar o tirante apertando a porca, cria-se uma zona de compressão no maciço de maneira a funcionar como um reforço ativo (Figura 2).

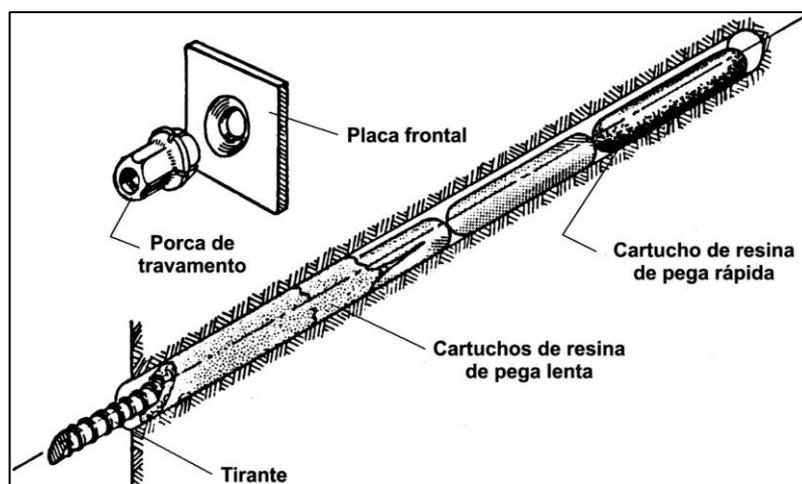


Figura 2. Tirante ancorado com cartuchos de resina (Pereira, 2018).

4 ANÁLISES E RESULTADOS

. Primeiramente, o trabalho foi conduzido para obter parâmetros importantes para as análises de resistência de aderência para os tirantes (t/m) e de extensão da zona de dano para o maciço rochoso (m). Em seguida, foram realizadas análises equilíbrio/limite para análise de estabilidade proposta neste trabalho.

4.1 Resistência de aderência

Com intuito de conhecer a resistência de aderência de acordo com o comprimento de ancoragem GF (*Grip Factor*) para o atirantamento, foram realizados 36 testes de arranque em tirantes seguindo a metodologia *Short Encapsulation Pull Teste* (SEPT). Considerou-se um comprimento de ancoragem inferior ao praticado operacionalmente, de modo que a resistência de aderência seja menor que a resistência a tração do tirante. Assim, os testes induzem o sistema a deslizar com o objetivo de conhecer a resistência por comprimento de ancoragem.

Primeiramente, realizou-se a perfuração com o equipamento Robolt Sandvik DS311. O cartucho de resina foi inserido no furo de forma manual. O tirante foi instalado com o equipamento realizando um tempo médio de mistura da resina de 35 segundos. Após 90 segundos, a chave de torque (acoplada a porca do tirante para rotação) foi desacoplada. Esse tempo corresponde ao período mínimo necessário para que evitar quebras na cristalização da resina e/ou perda de transferência de carga entre o tirante e rocha.

A Figura 3 ilustra com desenho esquemático e imagens de campo dos testes realizados. O conjunto de força utilizado é composto por um tripé e o cilindro de força hidráulica.

Os resultados para o GF de cada teste foram obtidos pela razão entre a carga máxima aplicada até o deslizamento (t) pelo comprimento de ancoragem (m).

Considerando a média de GF para tirantes com 19 mm, obteve-se 16.9 t/m em perfurações com diâmetro de 33 mm e 19 t/m para perfurações com diâmetro de 32 mm.

Com o intuito de obter parâmetros para fins comparativos, testou-se tirantes de diâmetro de 22 mm com furos de diâmetro 35 mm. Considerando a média dos resultados para esses testes, obteve-se um GF de 20.2 t/m .

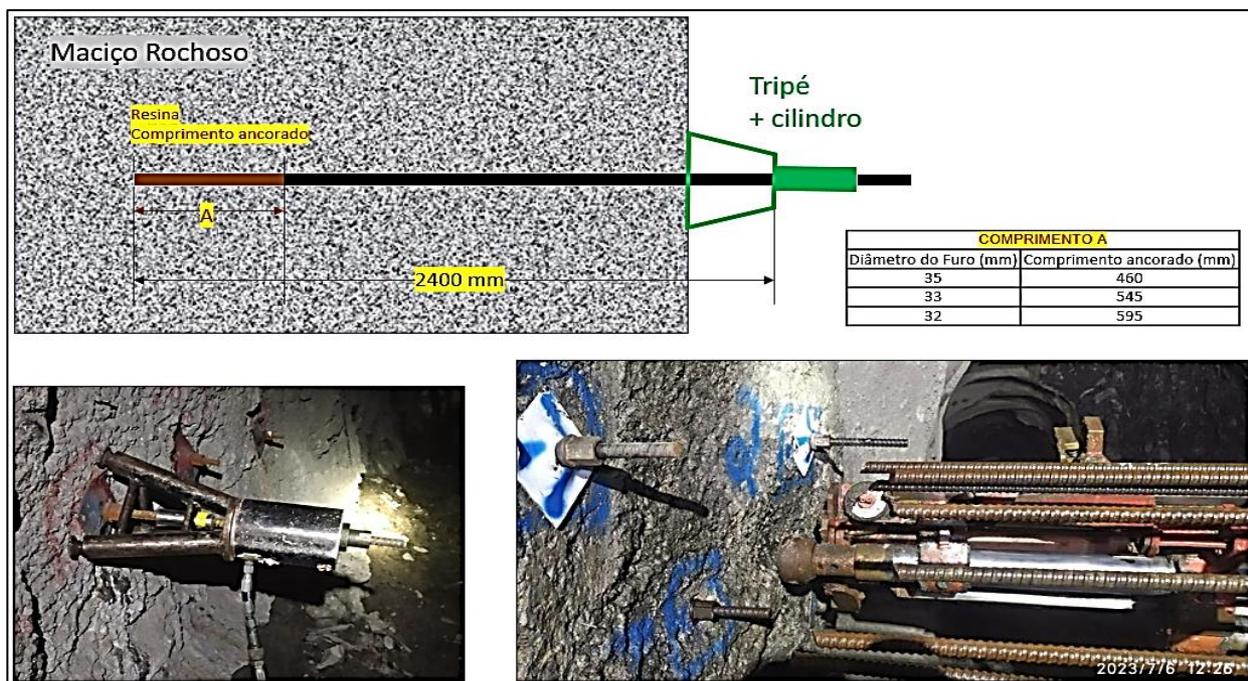


Figura 3. Desenho esquemático e imagens dos testes de arranque

4.2 Zona de dano do maciço rochoso

A obtenção da zona de dano do maciço foi realizada via filmagem de furos nas adjacências das escavações antes e após as detonações. Ressalta-se que a microcamera conta com um dispositivo que permite medir a metragem ao longo do furo.

Realizou-se 4 seções com 3 furos de filmagem cada abrangendo os tipos de maciço da mina de Aripuanã. As imagens obtidas foram comparadas antes e após as detonações em busca das feições que caracterizam a zona de dano como descrito por Sharma (2020).

O maior valor para zona de dano encontrado foi na galeria nomeada LI2_N2.2_GT. No Furo 3 dessa seção, observou-se uma expansão de descontinuidade pré existente em até 1.1 m de profundidade (Figura 4).

Vale destacar que esse método, apesar de fornecer imagens diretas do interior do maciço, possui certo grau de subjetividade por quem as analisa. Tendo em vista essas limitações para mensurar a zona de dano, adotou-se o valor conservador (mais crítico) de 1.1 m, oriundo das análises na LI2_N2.2_GT, como parâmetro de Zona de Dano ao longo deste trabalho.

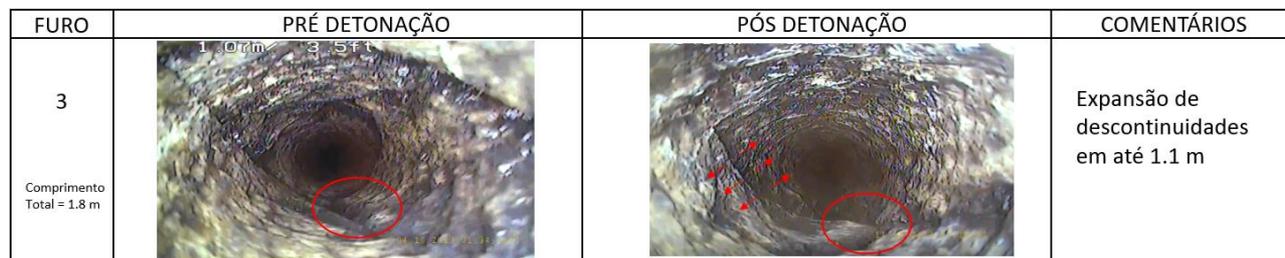


Figura 4. Análise de filmagem do Furo 3 da seção na LI2_N2.2_GT.

4.3 Análise cinemática por cunhas tetraedricas

As análises cinemáticas de cunhas foram conduzidas utilizando o *software* Unwedge®, desenvolvido pela Rocscience para aplicação em atividades de mineração subterrânea em rocha dura. Esse programa emprega a teoria dos blocos-chave proposta por Goodman e Shi (1985), juntamente com o método de equilíbrio limite, visando estimar o Fator de Segurança (FS) para os cenários propostos. Essa técnica leva em consideração os seguintes parâmetros, discutidos individualmente na sequência: geometria e orientação das

galerias; orientação das descontinuidades; coesão e ângulo de atrito das descontinuidades; propriedades físicas dos elementos de contenção e malha de contenção.

Como seção padrão para galerias, foram adotadas as dimensões de projeto com altura de 5.5 m e largura de 5 m. Além da seção padrão, a análise considerou cenários com *overbreak*, visando obter resultados mais realísticos. Aplicando-se o *overbreak* de 16.6% (média do último ano) na seção padrão, resulta-se em uma galeria de 6.1 x 6 m.

Em Aripuanã são encontradas três famílias de descontinuidades principais em toda a extensão da mina, sendo a Foliação (S1) e duas famílias de Fratura (F1 e F2). Além dessas, por vezes ocorre uma família de fratura aleatória (F3), contribuindo para um nível de fraturamento considerável. Essas estruturas determinam o comportamento mecânico do maciço rochoso e controlam a discretização de blocos. Usando um estereograma, determinou-se as seguintes medidas representativas de mergulho e direção de mergulho em graus: 59/16, 81/120, 45/193 e 41/318 para S1, F1, F2 e F3, respectivamente.

Os valores de JRC foram estimados para cada estrutura com base no trabalho de Barton, Lien e Lunde (1974). Para S1 utilizou-se o valor de JRC de 2 e, para as Fraturas (F1, F2 e F3), considerou-se um JRC de 3 (mais rugosas).

Para o JCS, considerou-se o menor valor proposto por Barton, Lien e Lunde (1974), de 30 KPa para a litologia Xisto. A utilização de um valor inferior induz a um conservadorismo nos resultados da análise.

Para o valor de ϕ_r , considerou-se uma aproximação com o valor do ângulo de atrito básico (ϕ_b). O valor utilizado foi baseado nos ensaios realizados por Machado (2018). A autora encontrou valores de ϕ_b utilizando a mesa de *Tilt-Teste* para várias litologias. Para as análises cinemáticas, adotou-se o valor médio de 26 graus para a litologia Xisto.

A Tabela 1 resume os parâmetros de suporte considerados. Vale destacar que, considerando 2.3m do tirante no interior do maciço, descontando o valor de 1.1 m de Zona de Dano do maciço, utilizou-se um comprimento de ancoragem de 1.2 m.

Utilizou-se cenários com malha/espacamento entre tirantes de 2 x 2 m, contemplando possíveis anomalias operacionais para utilização de tirantes com diâmetro reduzido.

Tabela 1. Parâmetros de suporte

Tipo/Características	Tirantes - 19mm	Tirantes - 22mm
Comprimento (m)	2.3	2.3
Malha (m)	1.5 x 1.5 e 2 x 2	1.5 x 1.5
Tração da Barra (t)	18.9	25
Resistencia da chapa (t)	7	7
Grip Factor (t/m)	19.0	20.2
Comprimento de ancoragem (m)	1.2	1.2
Resistencia ao cisalhamento (t)	9	16

A Tabela 2 mostra os cinco cenários na análise avaliados, variando as dimensões da galeria, malha e diâmetro dos tirantes. O cenário com tirantes de 22 mm (atual) foi utilizado com intuito de analisar a influência da redução do diâmetro dos tirantes no FS em condições padrões de malha e dimensões de galeria.

Tabela 2. Cenários utilizados para análise em galerias

Cenário	Galeria (m)	Malha (m)	Diâmetro de Tirante (mm)
1	5x5.5	1.5	19
2	5x5.5	2	19
3	6.1x6	1.5	19
4	6.1x6	2	19
5	5x5.5	1.5	22

Considerando as direções de maior criticidade, o gráfico da Figura 5 apresenta os resultados de FS para cada cenário avaliado. De acordo com o *Guia Corporativo de Mecânica de Rocas* (2023) da Nexa Resources, o menor FS aceitável para uma escavação de desenvolvimento é 1.3. Assim, esse valor foi utilizado como referência nos resultados.

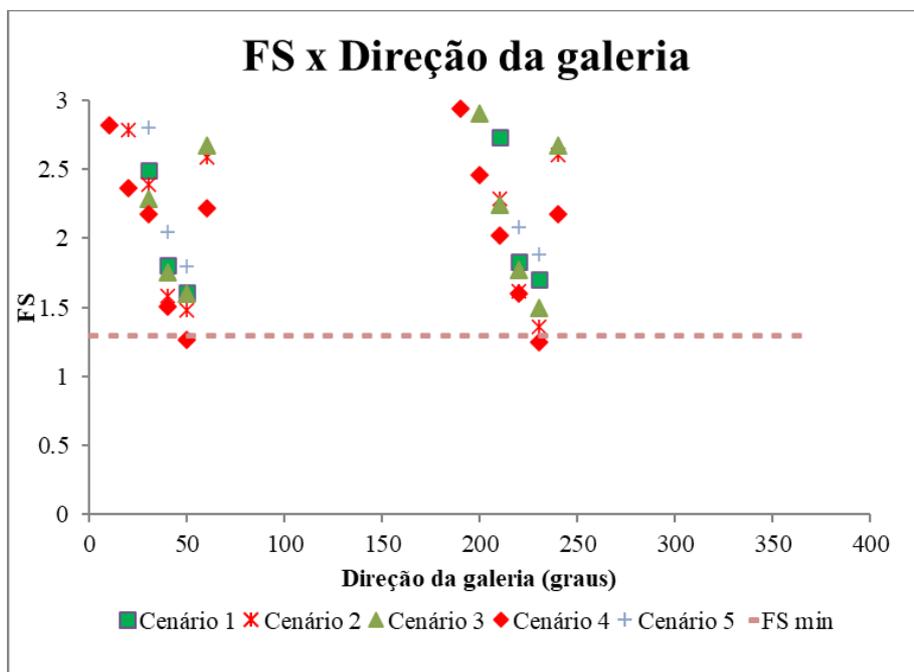


Figura 5. Resultados para os cenários avaliados considerando FS x Direção da galeria.

Considerando a redução no diâmetro dos tirantes, a análise aponta para uma redução no FS de 1.8 para 1.6 (no pior caso – direção de 50 graus), comparando o cenário 5 com o cenário 1.

Para os cenários com tirantes de 19 mm e *overbreak* na galeria (tamanho 6.1 x 6 m) o menor FS encontrado é 1.5. Considerando escavação sem *overbreak* e alteração na malha para 2 m, o menor FS encontrado chega a 1.3. Por fim, o pior cenário – malha de 2 m e galeria de 6.1 x 6 m – resulta em FS de 1.2.

Buscando interpretar os resultados estatisticamente, considerou-se todos os cenários gerados no histograma da Figura 6, contemplando todas as direções possíveis de escavação bem como variações nas dimensões da galeria e malha.

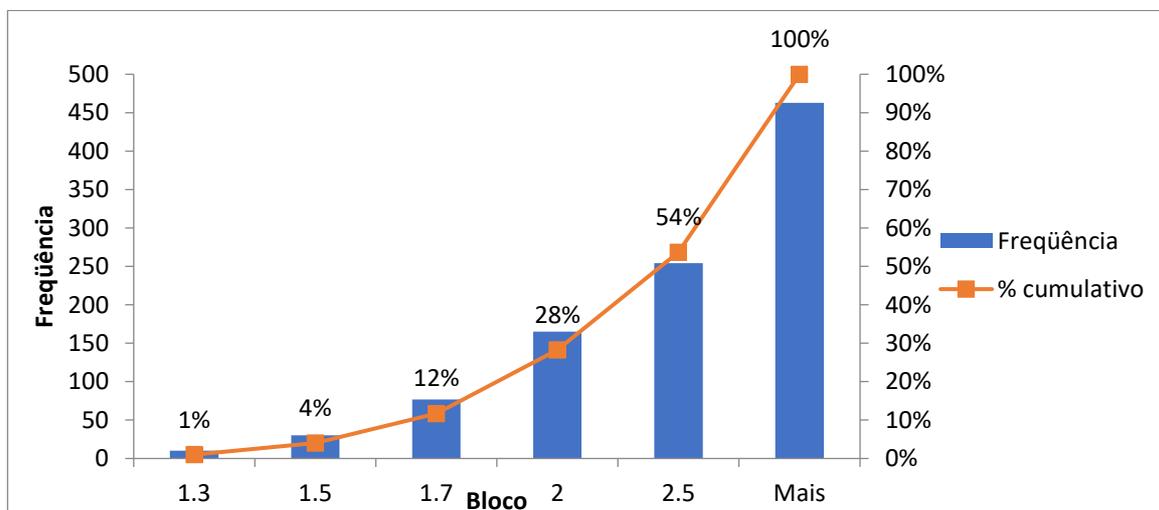


Figura 6. Histograma de FS para todos os cenários considerados.

4 CONCLUSOES

O trabalho reuniu informações importantes para avaliar a estabilidade das escavações perante a redução do diâmetro dos tirantes na mina de Aripuanã.

Os testes de arrancamento seguindo a metodologia SEPT para tirantes de diâmetro 19mm indicaram valores de 19 t/m para perfuração com diâmetro de 32mm e 16.9 t/m para diâmetro de 33 mm. Dessa forma, a perfuração com bit de 32 mm é preferível em termos de resistência e o valor de 19 t/m foi adotado nas análises subsequentes.

As filmagens de furos com microcâmera antes e após o desmonte permitiram estimar a zona de dano para o maciço rochoso. Adotou-se o maior valor encontrado de 1.1 m de profundidade para esse parâmetro. Dessa forma, as análises tendem a apresentar resultados mais conservadores, presando pela segurança das escavações.

As análises cinemáticas por cunhas tetraédricas para galerias indicaram uma redução no FS de 1.8 para 1.6 (direção mais crítica) com a redução do diâmetro dos tirantes proposta no trabalho.

Constatou-se depreciação no FS ao inserir overbreak na galeria e malhas mais espaçadas nas análises, considerando cenários com tirantes de 19 mm. O cenário que contempla anomalias operacionais nas dimensões da galeria e malha gera um FS de 1.2 nas direções de 50 e 230 graus. Tendo em vista que o menor FS aceitável é 1.3, galerias escavadas nessas direções devem ter controle de qualidade intensificado de modo a assegurar assertividade na malha e aderência ao projeto de escavação.

Considerando todos os cenários, incluindo anomalias operacionais, somente 1% dos casos têm FS menor que 1.3. Dessa forma, as análises apontam condições favoráveis para a mudança proposta.

AGRADECIMENTOS

A Nexa Resources em especial a equipe de Geomecânica da mina de Aripuanã por ter incentivado e suportado a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, N., Bandis, S. (1982) Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock, *Proceedings of 23rd US Symposium of Rock Mechanics*. New York: Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, ch. 76, p.739-760.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, vol. 6, p.189-236.
- Brady, B.H., Brown E.T. (2004) *Rock mechanics for underground mining*, 3rd ed. [S. l.], Springer, 628p.
- Cota, R.F. (2011) *Utilização de extensômetros e televisionamento de furos para estudo de estabilidade do hanging wall – realce 10.2 Fonte Grande Sul, Mina Cuiabá – Sabará/MG*. Dissertação de Mestrado, Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 99 f.
- Goodman, R., Shi, G. (1985) *Block theory and its application to rock engineering*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- Gritti, R.M. (2023) *Guia Corporativo de Mecânica de Rochas*, Documento interno da Nexa Resources. Disponível em plataforma interna da empresa.
- Hutchinson, D. J., Diederichs, M. S. (1996) *Cablebolting in underground mines*. Richmond, B.C., BiTech.
- Padula, R.C. (2016) *Determinação de Fatores de Correlação a partir da Caracterização do Maciço Rochoso na Mina de Cuiabá-Sabará/MG*. Dissertação de Mestrado, Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 139 f.
- Pereira, L. B. (2018) *Comportamento do sistema de suporte de uma mina subterrânea de ouro: caso de estudo - Mina Cascavel*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Faculdade de tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, 182 f.
- Sharma, A.K. (2020) Understanding Excavation Damaged Zone – In Tunnel. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, v.7, i.3, p.91-95, DOI: 10.17148/IARJSET.2020.7313.