

ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DOS SUPORTES ATIRANTADOS

Silas Alexandre De Castro
Altair Gomes Caixeta
Anelise Avelar De Araújo
Romério Ribeiro Da Silva
Matheus Dias Ruas

RESUMO

O presente estudo contextualizou sobre a mina subterrânea e suas principais características relacionadas a geotecnia na atuação da estabilidade das galerias e seus suportes de sustentação. Para aumentar o nível de segurança operacional, são instalados tirantes para sustentabilidade da galeria, com isso surgiu a ideia de otimizar a aplicação de tirantes para galerias com boas qualidades do maciço rochoso, baseados nas literaturas de Barton e Bieniawski. Para a proposta de tirante específico para uma área da mina, foram realizadas análise técnicas, levantamento histórico de queda de rocha, caracterização do maciço rochoso, dimensionamento de suportes e testes na mina. A conclusão do estudo constitui, em adotar o uso consciente da matéria prima e ciclos operacionais mais eficaz.

Palavra-chave: Geotecnia. Tirantes. Maciço Rochoso.

ABSTRACT

The present study contextualized the underground mine and its main characteristics related to geotechnics in the performance of the stability of the galleries and their support supports. To increase the level of operational safety, tie rods are installed for the gallery's sustainability, which led to the idea of optimizing the application of tie rods for galleries with good qualities of the rock mass, based on the literature by Barton and Bieniawski. For the proposal of a specific tie rod for an area of the mine, technical analyzes were carried out, a survey of rockfall history, characterization of the rock mass, sizing of supports and tests in the mine. The conclusion of the study is to adopt the conscious use of raw materials and more effective operational cycles.

Keyword: *Geotechnics. Tie rods. Rocky Massif.*

1 INTRODUÇÃO

Mineração subterrânea é uma engenharia complexa para extrair minérios, que tem objetivo de otimizar recursos e minerar de forma eficaz e segura.

Para o desenvolvimento de uma mina subterrânea, vários setores são necessários para que se tenha um planejamento eficaz e viabilize a mineração daquele local.

A geotecnia é um setor que é responsável pela estabilidade das galerias. Para as avaliações geotécnicas, são realizadas avaliações do maciço rochoso, identificando suas características como falhas, fraturas, litologias, classificação de sua qualidade etc.

De acordo com a classificação da rocha, surgem necessidades de aumentar o nível de estabilidade da galeria ou até mesmo estabilizar uma área de risco. A geotecnia utiliza suportes, que podem variar de tipo, conforme a necessidade do local para garantir uma área estável.

O suporte mais comum na mina subterrânea é o tirante. Para sua aplicação, o direcionamento é feito pela equipe da geotecnia e a operação de mina, realiza sua aplicação, com o uso de um equipamento dedicado.

2 MINA SUBTERRÂNEA DE MORRO AGUDO

A mineração subterrânea da mina de Morro Agudo, localizada em Paracatu – MG, está em atividade a mais de quarenta anos, com extração de zinco, chumbo e calcário. A mina está com mais de 130 quilômetros de galerias e aproximadamente 800 metros de profundidade e o método de lavra é o *sublevel stoping* e câmara e pilares.

O zinco é o principal minério de Morro Agudo, com a extração e processo de beneficiamento do minério, ele é transferido para outra unidade da empresa que fica em Três Marias – MG para dar sequência com tratamento do minério e posteriormente ser comercializado.

O chumbo está muito associado ao minério de zinco encontrado em Morro

Agudo, que após a separação na planta de beneficiamento o chumbo é comercializado internamente no país e para o exterior.

O calcário está presente na rocha matriz da mina, que é o Dolarenito e após beneficiamento do zinco e do chumbo na planta do processo, o minério restante é o calcário, que é comercializado para agricultura ao redor de Paracatu – MG.

Uma grande vantagem da mina subterrânea de Morro Agudo é que todo material do processo é aproveitado economicamente.

2.1 TRATAMENTO E SUPORTES DE MINA SUBTERRÂNEA

Para garantir a estabilidade do maciço rochoso, são adotados vários procedimentos de engenharia e processos técnicos.

Após abertura de uma galeria subterrânea, o procedimento é retirar as rochas soltas do teto e laterais, também conhecida como choco, utilizando equipamentos com braços mecânicos, para não expor pessoas a uma determinada área de instabilidade. Com a galeria tratada, o setor de geotecnia da mina, direciona o melhor suporte para aquele tipo de rocha.

Exemplos de suporte utilizados em minas subterrâneas são, tirantes, cambotas, concreto projetado, cabos de aço e telas de aço.

O tirante (figura 1), é uma barra de aço com diâmetro e comprimento variados. O aço tem formato helicoidal e composto por roscas, porca e chapa de fixação.

As cambotas são vigas de aço, são usadas em locais onde a rocha é instável. Para montagem da cambota, as vigas são soldadas e conformando toda a circunferência do túnel ou galeria subterrânea.

As rochas com estabilidades baixas, podem receber o reforço com concreto projetado. O concreto é feito diferentes tipos de traço, é adicionado uma malha de aço ou sintética, para garantir uma maior resistência do concreto.

A tela de aço é similar ao concreto, é instalada no teto e laterais e fixada no tirante, mas a tela irá trabalhar somente quando alguma porção de rocha vier a soltar e a tela tem a função de segurar esses blocos soltos.

Os cabos de aço são instalados na rocha, com o mesmo processo de tirantes, mas para fixar os cabos, são injetados calda de cimento no furo e

posteriormente os cabos de aço. Eles podem variar de comprimentos, geralmente são utilizados de 6 a 12 metros de profundidade.

FIGURA 1 - Tirantes de 2,4 metros e tirantes para teste de 1,8 metros

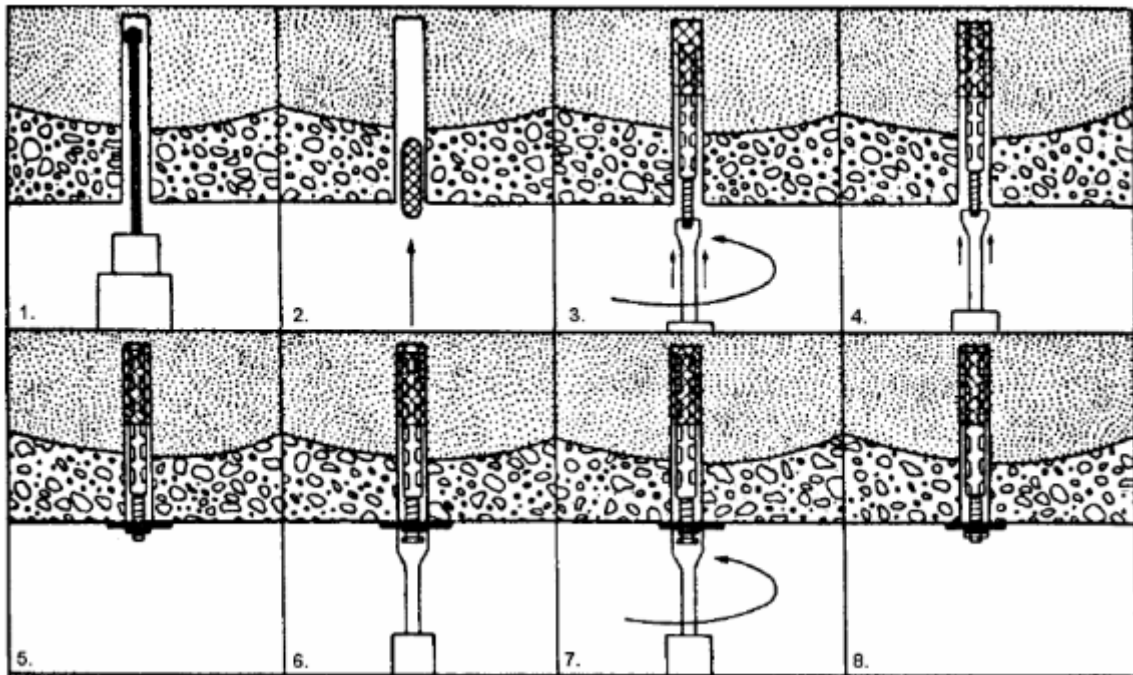


Fonte: Almojarifado da mina de Morro Agudo

2.2 TIRANTES ANCORADOS COM RESINAS

Segundo Hoek *et al.* (2000), os tirantes podem ser fixados por resinas, que tem o objetivo de preencher o espaço entre o furo e o tirante gerando atrito necessário para uma ancoragem muito segura. A resina é disposta em cartuchos de plástico, contendo separadamente a resina e o catalisador. Para realizar a procedimento de ancoragem, o cartucho é inserido até o final do furo e posteriormente, rompido e rotacionado, pelo próprio tirante, fazendo com que os compartimentos se rompam e ocorra a mistura dos componentes. Em alguns minutos após a mistura ocorre a cura da resina (figura 2) do Karabin & Hoch (1979).

FIGURA 2 - Sequência de aplicação de tirantes com resinas.

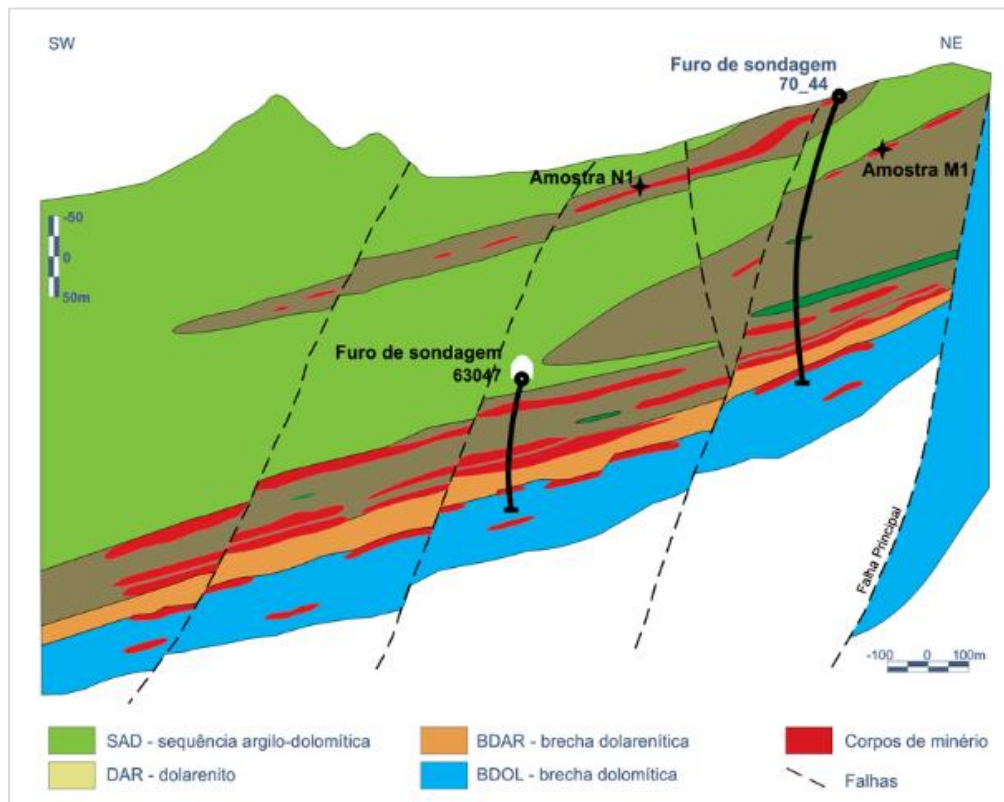


Fonte: Karabin & Hoch, 1979.

3 CARACTERIZAÇÃO DA MINA DE MORRO AGUDO

A estrutura é uma feição geológica de muita importância na mina devido à sua interferência nos projetos de extração do minério da mina Morro Agudo. O perfil geológico (figura 3) conforme NEVES (2011), uma quantidade muito grande de falhas de rejeito reduzido e um mergulho de rochas desfavorável dificultam sobremaneira a execução do plano de lavra.

FIGURA 3 - Perfil Geológico de Morro Agudo



Fonte: NEVES, 2011.

3.1 GEOLOGIA REGIONAL

O depósito de sulfetos de zinco-chumbo da Mina de Morro Agudo, conforme Dardene, (2000), encontra-se associado às rochas carbonáticas de ambiente recifal, idade pré-cambriana superior, pertencentes à Formação Vazante (figura 4), Grupo Bambuí.

Todas as rochas da região pertencem ao Pré- Cambriano Superior, Grupo Bambuí, subdividido em Formação Vazante e Formação Paracatu, de cobertura.

FIGURA 4 - Coluna Litoestratigráfica do Grupo Vazante

Grupo	Formação	Membro	Descrição e depósitos/ocor- rências minerais associadas	
VAZANTE	Lapa	Serra da Lapa	Ardósias carbonatadas cinzas e lentes de dolomitos	
		Serra do Velosinho	Ardósias carbonatadas pretas	
	Morro do Calcário	Pamplona Superior	Bioherma estromatolítica, fácies de brechas e dolarenitos Depósitos minerais: Morro Agudo, Fagundes e Ambrósia	
		Serra do Poço Verde	Pamplona Intermediário	
	Pamplona Inferior		Ardósias cinza a verde com intercalações de dolomitos rosados Depósito mineral: Vazante	
	Morro do Pinheiro Superior	Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-escuros com esteiras estromatolíticas e <i>birds eyes</i>	
		Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-claros a rosados com intercalações de brechas e dolarenitos	
	Serra do Garrote		Ardósias cinzas com lentes de quartzitos esporádicas	
	Lagamar	Sumidouro	Bioherma estromatolítica	
		Arrependido	Calcários cinza-escuros e brechas dolomíticas Conglomerados	
	Rocinha		Ritmitos Depósito mineral: Lagamar - fosforito	
			Ardósias cinza-escuras, piritosas e fosfatadas Depósito mineral: Rocinha - fosforito	
			Ritmitos	
Santo Antônio do Bonito		Intercalações de quartzitos, fosforitos, diamictitos e ardósias Ocorrência mineral: Coromandel - fosforito		

Fonte: Modificado Dardenne, 2000.

A Formação Paracatu está estratigraficamente acima da Formação Vazante e é constituída essencialmente por filitos negros e quartzitos que ocorrem a oeste de um alinhamento que inclui as serras das Araras e se estende para norte passando a oeste da cidade de Paracatu.

3.2 GEOLOGIA DA MINA DE MORRO AGUDO

São descritos 4 tipos de litologias; Brechas Dolomíticas, Brechas Dolareníticas, Dolarenitos e Sequência Argila Dolomíticas.

O minério encontra-se na Sequência de Vazante, hospedados em dolarenitos, brechas dolareníticas e dolomíticas pertencentes às Fácies Morro do Calcário, que compreende o complexo recifal.

A mineralização sulfetada de zinco e de chumbo da Mina de Morro Agudo está disposta segundo a direção N10E mergulhando 20° para oeste. O minério apresenta-se em lentes com uma espessura média de aproximadamente 5 metros de potência.

3.3 GEOTECNIA DA MINA DE MORRO AGUDO

As escavações de Morro Agudo estão globalmente em um maciço muito competente, de altas resistências, pouco a medianamente fraturado, portanto, de boa qualidade.

A principal característica que define os maciços rochosos da mina (figura 5), é estarem associados, principalmente às litologias e de forma localizada, ao grau de faturamento.

As rupturas observadas do maciço são geralmente controladas pelas descontinuidades sub-horizontais, que possuem espaçamento irregular, variando de decimétrico, principalmente, a métrico, podendo elas estarem isoladas ou truncadas por descontinuidades sub verticais. As falhas de contato entre as litologias possuem baixa resistência, sendo planas lisas, por vezes estriadas, na escala de lavra.

FIGURA 5 - Classificação Geomecânica da mina de Morro Agudo

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA - MINA DE MORRO AGUDO										
LEGENDA	CLASSE	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRACTURAMENTO	LITOLOGIA	UCS (MPa)	Nº FAMILIA DISCONTINUIDADES	CONDIÇÃO DESCONTINUIDADES	RQD	RMR	OBS
	I	A1	F2/F3	DAR	210	2	Legenete rugosa, somente oxidação	70-90	81 - 100	
	II	A1	F3/F4	SAD	110	3	Plana lisa a estriada	50-69	61 - 80	
	III	A1	F3/F4	DAR	100	3 + aleatorias	Plana lisa a estriada	50	41 - 60	*
	IV	A2	F4/F5	SAD	-	4 + aleatorias	Plana lisa a estriada	<50	21 - 40	
* Não representativo na escala da lavra.										
Grau de fracturamento						Grau de alteração				
F1 - Pouco fraturado: espaçamento médio das fraturas >2m, formando blocos da ordem de m3. F2 - Pouco fraturado: espaçamento médio das fraturas de 0.6 a 2m, formando blocos da ordem de dm3 a m3. F3 - Medianamente fraturado: espaçamento médio das fraturas de 0.2m a 0.6m, formando blocos da ordem de dm3 a m3. F4 - Muito fraturado: espaçamento médio das fraturas de 0.06m a 0.2m, formando blocos da ordem de cm3 a dm3. F5 - Muito fraturado: espaçamento médio das fraturas <0.06m, formando blocos da ordem de cm3.						A1 - Sem alteração A2 - Alteração pouco penetrante. Descoloração da alguns minerais. A rocha perde muito pouca resistência ao impacto do martelo e não é friável. A3 - Rocha muito descolorida. Alteração dos minerais é muito penetrante, assumindo colorações predominantemente alaranjadas e avermelhadas. A4 - Rocha totalmente alterada com porções de argila bem desenvolvidas. Fragmentos friáveis e preservam a estrutura original da rocha. A5 - Solo: a textura original a rocha foi totalmente destruída, apresentando geralmente cores avermelhadas.				

Fonte: Manual de Escavação de Morro Agudo

Para facilitar os estudos geomecânicos e a individualização dos maciços

da mina de Morro Agudo, foi criado um agrupamento dos tipos de maciço rochosos denominados como Unidades Geotécnicas (Figura 5). Esse agrupamento engloba maciços com características geotécnicas semelhantes, realizado a partir de classificações de qualidade do maciço conforme a Índice Q (**BARTON**) e RMR (**BIENIAWSKI**), assim como os mecanismos de ruptura associados a cada um desses maciços.

4 ESTUDOS TÉCNICOS REALIZADOS

O estudo está fundamentado em informações de caracterização do maciço rochoso das regiões em desenvolvimento de galerias, análises empíricas, analíticas e numéricas das aberturas das galerias propostas e avaliar a possibilidade de mudar o comprimento do tirante instalado atualmente em áreas pontuais da mina, como também reduzir o número de resinas por tirantes e pontuar as mudanças realizadas.

4.1 EVENTOS DE QUEDA DE ROCHA

O critério de falha de Hoek-Brown (1983) foi desenvolvido para a estimativa da resistência de maciço de rocha de elevada qualidade com o propósito de fornecer dados de partida em projetos de escavações subterrâneas. O maciço rochoso da mina de Morro Agudo tem se caracterizado de boa qualidade, em função da resistência da rocha, baixo grau de fraturamento e por ser considerada uma mina seca, salvo em algumas condições específicas de contato DAR e SAD, falhas normais e estruturas de acamamento sub-horizontais.

Apesar da notada qualidade das rochas que compõe o maciço rochoso, eventos de instabilidade e queda de rocha ocorreram com o passar dos anos. A espessura desses blocos, não ultrapassam 1,0 metro e todas essas as áreas não tinham suportes.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO

Com base nos trabalhos de mapeamento geotécnico de campo, utilizando a tabela de dados geotécnicos que Bieniawski publicou esta classificação em 1976

(tabela 1), tendo por base uma vasta experiência colhida em obras subterrâneas foi possível obter as famílias estruturais que fazem parte do maciço, como também a classificação da qualidade dos diferentes litotipos.

TABELA 1 - Principais unidades geotécnicas no Morro Agudo

Unidade Geotécnica	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q
DAR	70	9	1,5	1,0	1,0	1	11,5
SAD	58	9	1,0	1,0	1,0	1	6,6

Fonte: Tabela Bieniawski

Família S1: Estruturas de acamamento sub-horizontal associada a deposição sedimentar dos estratos.

Família S2: Estruturas de diaclase, origem tectônica.

Família S3: Estruturas de diaclase, origem tectônica.

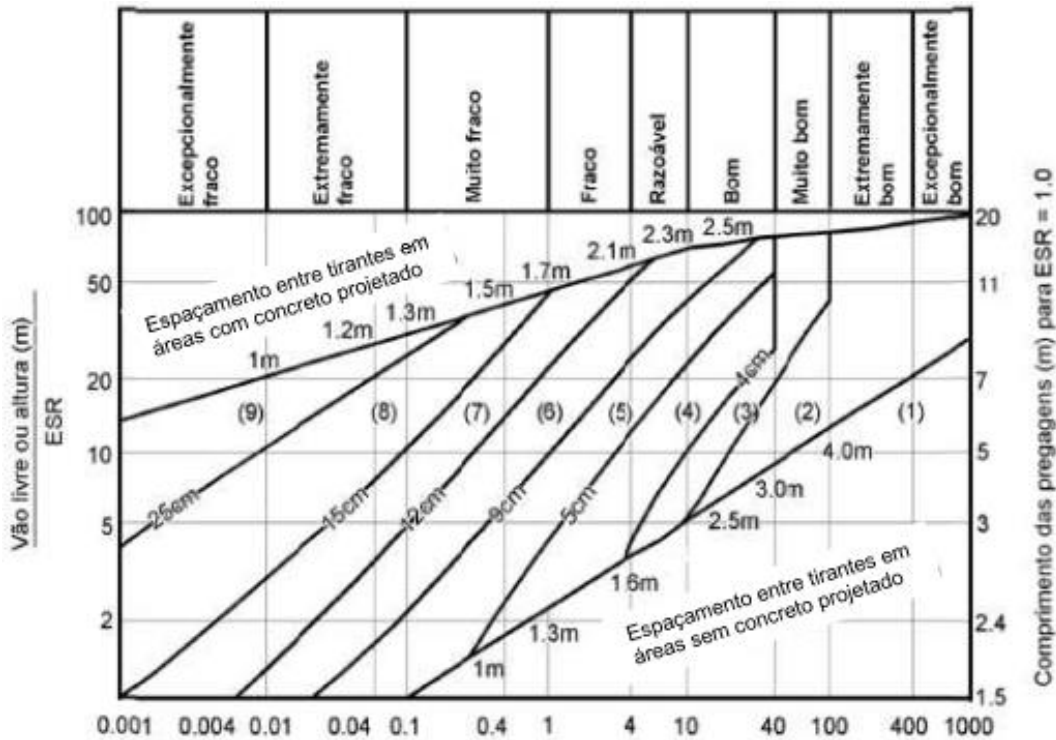
4.3 DIMENSIONAMENTO DE SUPORTES

Para que seja relacionado o valor calculado do sistema Q ao tipo de contenção requerida, é necessário que se defina a dimensão equivalente (DE) da escavação (figura 6), de **Grimstad e Barton** (1993). Tal parâmetro é obtido dividindo o vão, diâmetro ou altura da parede da escavação por um fator chamado de *excavation support ratio* (ESR).

$$DE = \frac{\text{Vão livre ou altura (m)}}{ESR}$$

A relação entre o índice Q e a dimensão equivalente (DE) da escavação determina o tipo de suporte apropriado, como mostrado no gráfico abaixo.

FIGURA 6 - Ábaco correlacionado a dimensão equivalente (DE), à qualidade do maciço segundo o sistema Q para se estimar as categorias de suporte permanente.



Fonte: Grimstad e Barton , 1993.

- (1) Sem suporte
- (2) Tirantes pontuais
- (3) Atirantamento sistemático
- (4) Atirantamento sistemático e concreto projetado não armado (4 – 10 cm)
- (5) Atirantamento sistemático e concreto projetado com fibras (5 – 9 cm)
- (6) Atirantamento sistemático e concreto projetado com fibras (9 – 12 cm)
- (7) Atirantamento sistemático e concreto projetado com fibras (12 – 15 cm)
- (8) Concreto projetado com fibras (>15cm), arcos de concreto projetado armado e atirantamento
- (9) Placas pré-moldadas de concreto

Nota-se que o comprimento (L) dos tirantes não está especificado no gráfico, mas pode ser determinado de acordo com a equação abaixo (BARTON et al., 1974):

$$L = \frac{2 + 0,15B}{ESR}$$

Em que, B é largura da escavação em metros. Adicionalmente, também se pode calcular o vão máximo de uma escavação sem a necessidade de contenção através da seguinte fórmula:

$$\text{Máximo vão sem escoramento} = 2(ESR)Q^{0,4}$$

Para galerias permanentes é usado um fator ESR de 1,6 e para galerias temporais o ESR de 3.

Dimensionamento do comprimento de tirante.

$$L = \frac{2 + 0,15B}{ESR}$$

Galerias Temporárias com vão de 5 metros.

$$L = \frac{2 + 0,15(5m)}{3}$$
$$L = 0,92m$$

Interseções Temporárias com vão de 10 metros.

$$L = \frac{2 + 0,15(10m)}{3}$$
$$L = 1,17m$$

Galerias Permanentes com vão de 5 metros.

$$L = \frac{2 + 0,15(5m)}{1,6}$$
$$L = 1,7m$$

Interseções Permanentes com vão de 10 metros.

$$L = \frac{2 + 0,15(10m)}{1,6}$$
$$L = 2,1m$$

De acordo com os cálculos de comprimento (L) de tirantes para ambas as situações de galerias permanentes e temporárias e interseções temporárias, o estudo

presente é eficaz para o uso de tirantes com 1,8 metros de comprimento e 1,7 metros de ancoragem.

As interseções permanentes com 10 metros de vão, são necessários ancoragem de tirantes com 2,10 metros, logo o tirante proposto desse estudo não seria efetivo.

4.4 MÉTODO ANALÍTICO – ANÁLISE CINEMÁTICA

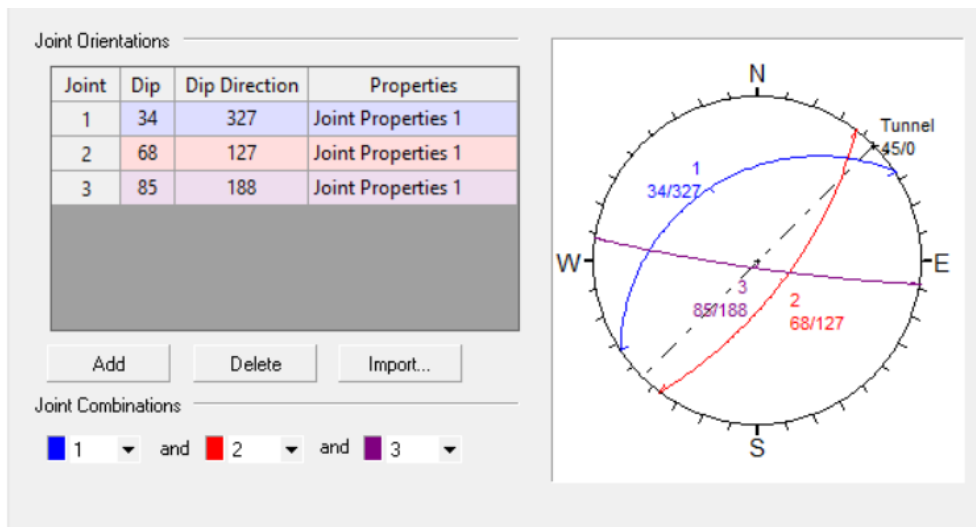
Essa metodologia utiliza a combinação de descontinuidades, conforme a figura 8 do software Rocscience DIPS, mapeadas em campo para análise de formação de cunhas no teto e nas laterais da galeria com a finalidade de estimar as dimensões geométricas e o seu peso e conseqüentemente o fator de segurança para o tipo de suporte aplicado.

Essa análise é de grande importância para o estudo proposto, pois além de verificar o esforço no qual o tirante vai ser solicitado, auxilia no dimensionamento e disposição correta do suporte para que se obtenha uma maior eficiência no sistema de suporte aplicado.

Nesse estudo foram utilizadas combinações do strike com as atitudes de três estruturas mapeadas na região proposta para ser feita a mudança.

Em todas as análises foram utilizados como fator de segurança mínimo aceitável de 1,3.

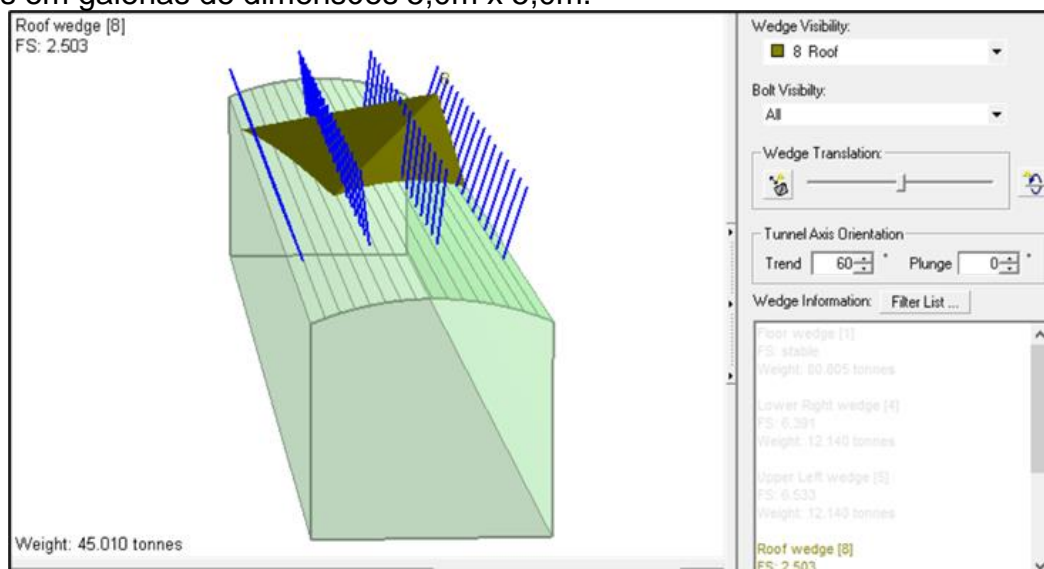
FIGURA 7 - Orientação das descontinuidades mapeadas na mina



Fonte: Rocscience DIPS

Análise de sensibilidade do fator de segurança, do software Unwedge conforme a figura 9, em função do strike de escavação e da resistência ao escoamento do aço para dimensões de uma galeria de 5,0m x 5,0m.

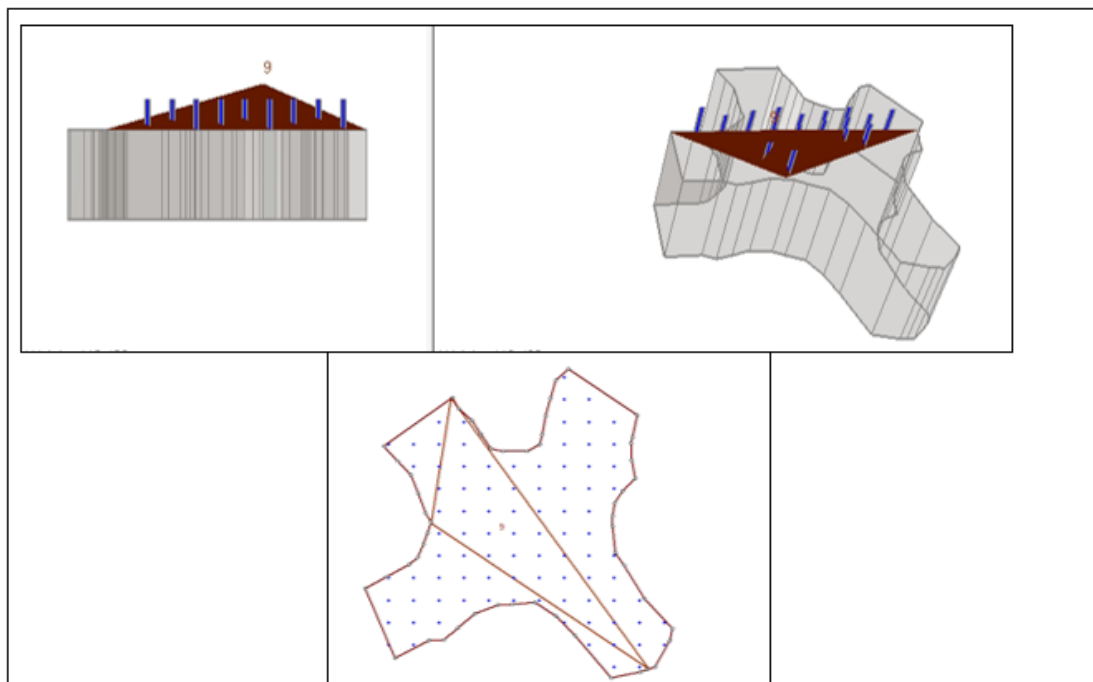
FIGURA 8 - Simulação feita no software Rocscience Unwedge com tirantes de 1,8 metros em galerias de dimensões 5,0m x 5,0m.



Fonte: Rocscience Unwedge

Seção esquemática da simulação da formação de cunhas (figura 10), em galerias de aberturas com vãos de 10 metros.

FIGURA 9 - Simulação da intersecção feita no software Rocscience Unwedge em galerias com vãos de 10 metros.



Fonte: Rocscience Unwedge

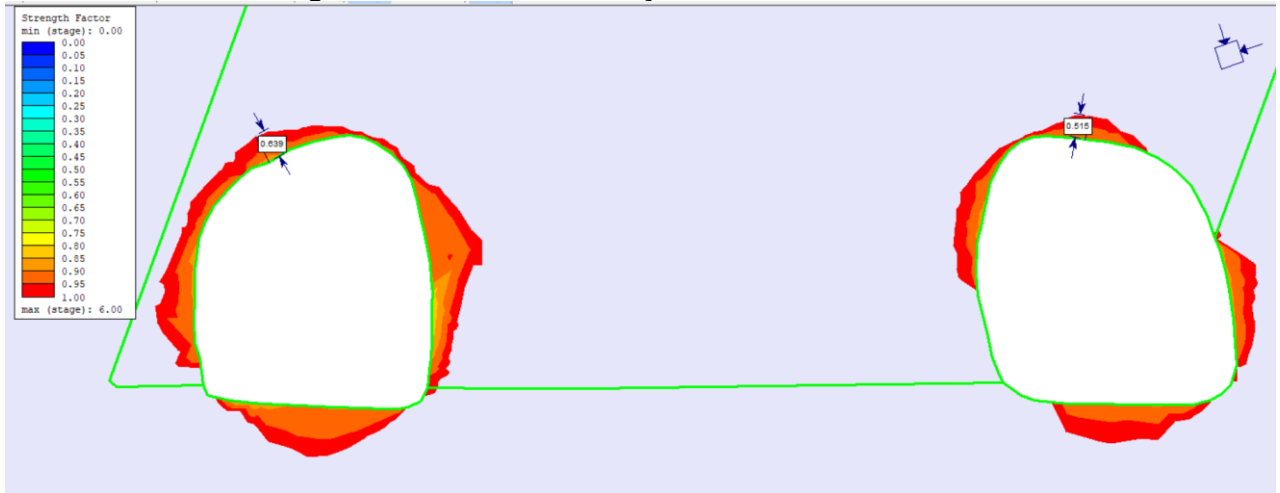
4.5 ANÁLISE NUMÉRICA

Para complementar o estudo foram feitas análises em 2D e 3D com a ajuda de softwares RS2 e o MAP3D com o objetivo de identificar a influência de tensões induzidas no maciço em sua forma plástica e elástica bem como a sua localização.

Com o auxílio do RS2 foram feitas análises com modelo plástico e elástico. Na modelagem elástica (figura 11) tivemos um resultado onde a maior espessura identificada no contorno da escavação ficou de 0,63m.

Para o tirante efetivo de 1,70m, demonstra que o estudo é eficiente, pois a estaria ancorado 1,07m além da laje demonstrada.

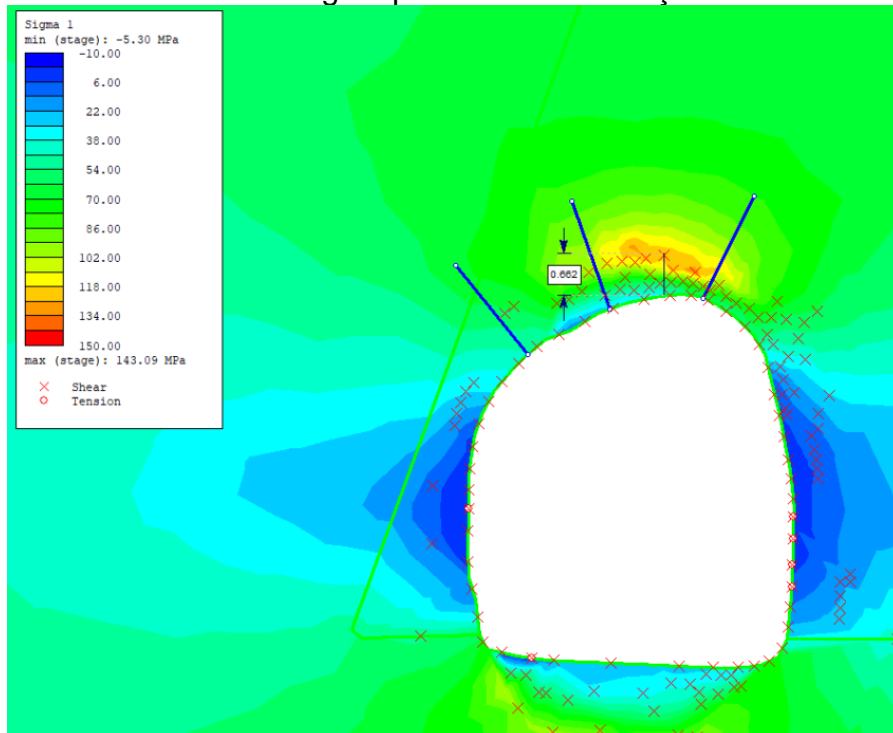
FIGURA 10 - Modelagem elástico da escavação com RS2



Fonte: Rocscience RS2

Conforme a imagem (figura 11) abaixo, percebemos a ação do desconfinamento da rocha após a abertura da escavação. O valor máximo calculado da zona plastificada chega a uma espessura de 0,66m, muito semelhante ao da modelagem elástico (figura 10). Demonstrando também a eficiência do tirante efetivo de 1,7 metros ancorados.

FIGURA 11 - Modelagem plástico da escavação com RS2



Fonte: Rocscience RS2

4.6 TESTES DE TIRANTES NA MINA

Foram realizados testes de aplicações de tirantes de 1,8 metros no bloco F da mina, na galeria no nível 783 – GM2. Aplicados 10 tirantes para testes (figura 13), com 4 resinas para cada tirante. Os tirantes foram pintados de vermelho, para diferenciar do tirante convencional utilizado.

FIGURA 12 - Aplicação de tirante de 1,8 metros na galeria 783-GM2



Fonte: Mina subterrânea de Morro Agudo

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados observados nas análises é possível manter um fator de segurança mínimo (1,3) com a redução do comprimento dos tirantes de 2,4 metros para 1,80 metros e reduzir a quantidade de resina de 6 bisnagas para 4.

As vantagens em aplicar tirantes menores em galerias que permitem tais alterações, é o resultado de um ciclo operacional mais rápido. A aplicação de um tirante de menor é mais rápido, pois as resinas secam mais rápidas, pois a quantidade inserida para o ancoramento do tirante é menor que o tirante convencional.

A redução no custo dos materiais, seja ele o próprio tirante e as resinas é um ponto que merece um destaque. O Tirante é mais barato, pois a quantidade de aço é menor e as resinas mantém o valor, mas a quantidade usada por tirante é menor.

As desvantagens em relação a utilizar dois tipos de tirantes é que precisa ter um controle rigoroso da equipe de geotecnia da mina, pois os tirantes são apenas para galerias temporárias do bloco E e F da mina, os demais acessos permanecem utilizando o tirante convencional de 2,4 metros.

Outro ponto de desvantagens é que os operadores precisam ser bem treinados e instruídos sobre quais galerias serão utilizados o tirante menor ou convencional.

REFERÊNCIAS

BARTON, N.R.; LIEN, R. and LUND, J. ***Engineering Classification of Rock Masses for the design of Tunnel Support***. Rock Mech. 1974 p.189-239.

_____. ***Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support***. Rock Mechanics. v. 6:4, 1974. p. 189-236.

BIENIAWSKI, Z.T. ***Geomechanics Classification of Rock Masses and its application in Tunnelling***, Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech., Denver 2, Part A, 1974. p.27-32.

CHAPRA, S. C. R. P. C. ***Métodos Numéricos para Engenharia***. 7. ed. São Paulo: AMGH Editora LTDA. 2016

DARDENNE, M. A. ***The Brasilia fold belt***. In: U. G. Cordani, E. G. Milani, A. Thomaz Filho, D. A. Campos (Eds.). Tectonic evolution of South America, p. 231-264. 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro. 2000

GRIMSTAD, E.; BARTON, N., **Updating of the Q-System for NMT**. In: Kompen, Opsahl & Berg, eds., *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete: Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*. Norwegian Concrete Association, Oslo. 1993. p. 46-66.

HOEK, E. *et al.* Rock. **Slopes in Civil and Mining Engineering. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering**. 2000. p. 1-16.

Hoek, E., Grabinsky, M., Diederichs, M., **Numerical modeling in rock mechanics. Sudbury: MRD – Mining Research Directorate**. 1989.

Daws, G., Karabin, G. J., & Hoch, M. T. **Site Investigation and Field Observation. Int Water Power Dam Constr**, 1979. p. 31, 34.

Manual de Escavação Morro Agudo. Geotecnia de Morro Agudo, 2022.

NEVES, LUIZ PANIAGO. **Características descritivas e genéticas do depósito de Zn-Pb Morro Agudo, Grupo Vazante**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011. p. 89

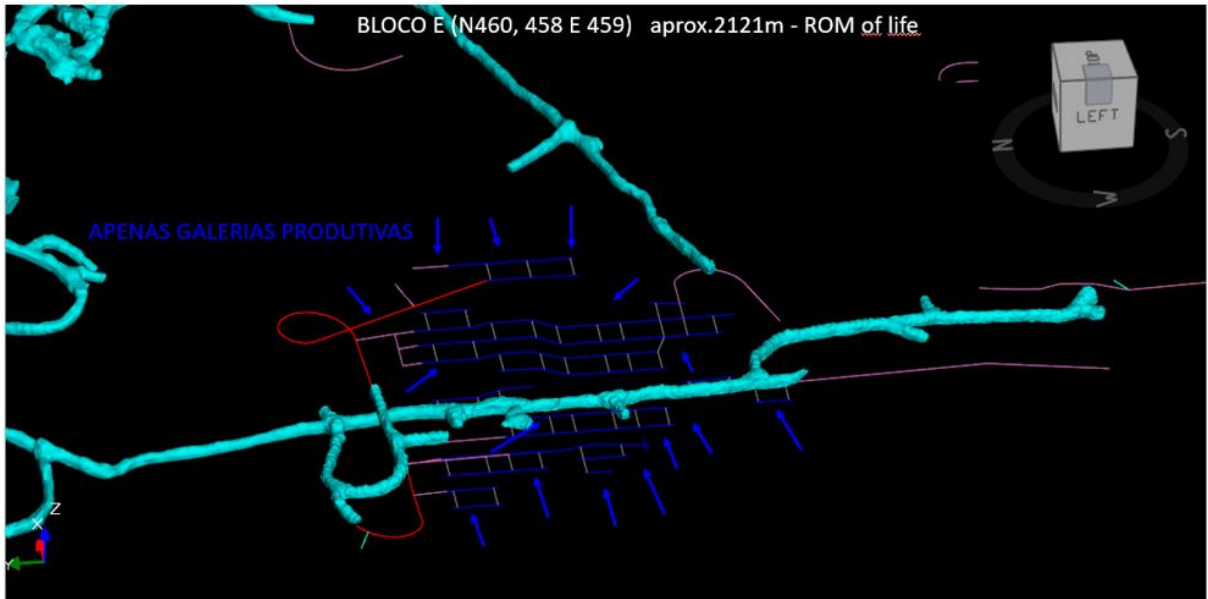
ROCSCIENCE. **Dips: software user's guide**. v. 7.0. Toronto, Ontário, Canada: Rocscience Inc. 2022.

ROCSCIENCE. **RS2 can also be used for Ground Support, Excavations, Dams, Settlement, and Rock & Soil Slopes**. Toronto, Ontário, Canada: Rocscience Inc, 2022.

ROCSCIENCE. **Unwedge: analysis of the geometry and stability of surface wedges**. v. 6.0. Toronto, Ontário, Canada: Rocscience Inc. 2014.

ANEXO A

Local da aplicação dos tirantes de 1,8 metros no bloco E



Local da aplicação dos tirantes de 1,8 metros no bloco F

