

Gestão de Risco Aplicada a Acessos Permanentes em Escavações Subterrâneas - Estudo de Caso: Mina Córrego do Sítio

Leandro Caio Barbosa Costa

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, LCCosta@AngloGoldAshanti.com.br

Yulder Cardenas Vilca

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, YCVilca@anglogoldashanti.com.br

Sandro Sander Chaves

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, SSChaves@anglogoldashanti.com.br

Michele Márcia de Souza

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, michellesouza88@hotmail.com

Pablo Gomes dos Santos

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, PGDosSantos@anglogoldashanti.com.br

RESUMO: Este trabalho refere-se à mina subterrânea do complexo Córrego do Sítio - Portaria I, de propriedade da AngloGold Ashanti, que é dividida nos seguintes corpos: Cachorro Bravo, Laranjeiras e Carvoaria. Mais especificamente, o artigo em questão refere-se à gestão de risco aplicada nas rampas de acesso aos corpos Laranjeiras e Carvoaria. Com o intuito de realizar um levantamento da condição de estabilidade atual dos acessos, foi elaborada uma metodologia para identificação de trechos considerados críticos. Para essa avaliação foi realizado o levantamento da qualidade do maciço rochoso, das descontinuidades singulares, da contenção aplicada ao longo de toda a rampa e do tamanho dos vãos praticados. A partir da representação e avaliação tridimensional dos parâmetros levantados, foi possível definir os trechos mais críticos, onde foi recomendada a execução de reforço do sistema de contenção. Também foram realizados dimensionamentos pelo método do equilíbrio-limite, utilizando o *software Unwedge*, para definição do suporte a ser recomendado nesses locais. A partir dessas análises foi definido um plano de ação que foi executado de acordo com a criticidade de cada trecho.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de risco, acessos permanentes, Córrego do Sítio, classificação de maciço rochoso, classificação de descontinuidades singulares, qualidade da contenção.

1 INTRODUÇÃO

O complexo Córrego do Sítio, de propriedade da AngloGold Ashanti, situa-se à 20 km da cidade de Santa Bárbara, sendo constituído por duas minas subterrâneas e uma mina a céu aberto (Figura 1). Uma das minas subterrâneas e a mina a céu aberto encontram-se na Portaria I e a segunda mina subterrânea localiza-se na Portaria II.

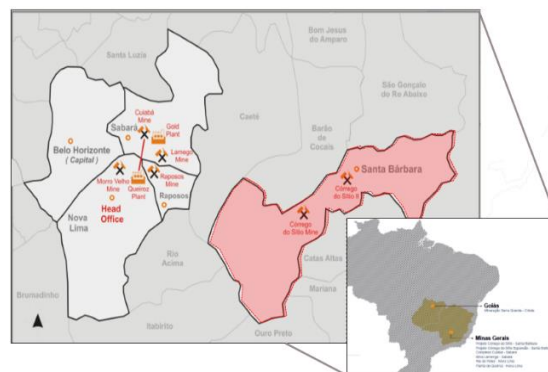


Figura 1: Localização do complexo Córrego do Sítio, destacado na cor vermelha.

A mina subterrânea localizada na Portaria I é subdividida nos corpos Cachorro Bravo, Laranjeiras e Carvoaria, sendo o acesso a esses corpos feito através de rampas.

Sabe-se que ao longo da vida útil de uma mina, diversos fatores podem modificar as condições iniciais do maciço rochoso, como detonações e/ou redistribuição de tensões. Tais eventos podem propiciar um incremento na zona de plastificação do maciço rochoso, aumentando, portanto, a probabilidade de desarticulações e rupturas.

Com o intuito de realizar um levantamento da situação atual dos acessos permanentes da mina Córrego do Sítio I, foi elaborada uma metodologia para identificação de trechos considerados críticos em relação à estabilidade. Para essa avaliação foi realizado o levantamento da qualidade do maciço rochoso, da contenção aplicada ao longo de toda a rampa e do tamanho dos vãos praticados. É importante ressaltar que durante todo o trabalho a rampa também foi inspecionada para identificar a presença de blocos de rocha potencialmente instáveis.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização Geomecânica do Maciço Rochoso.

A caracterização geomecânica foi obtida através de mapeamentos geotécnicos, sendo utilizadas as metodologias Q (Barton *et al.*, 1974) e RMR (Bieniawski, 1989) para classificar o maciço rochoso e um critério específico para classificar as descontinuidades singulares.

A classificação geomecânica proposta por Bieniawski (1989) atribui pesos a seis parâmetros considerados como os que mais contribuem para mudanças no comportamento do maciço rochoso.

Através da soma algébrica dos pesos, conforme mostra a equação (1), é possível obter o índice RMR, sendo este valor o que define a classificação do maciço.

$$RMR = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad (1)$$

Parâmetros considerados:

P₁: Resistência à compressão uniaxial do material rochoso;

P₂: RQD (*Rock Quality Designation*);

P₃: Espaçamento das descontinuidades;

P₄: Condições das descontinuidades;

P₅: Presença de água.

Já o índice de qualidade Q proposto por Barton *et al.* (1974) também leva em consideração seis fatores relevantes para caracterização e comportamento dos maciços rochosos, obtendo assim, um valor numérico através do uso da seguinte equação (2):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \quad (2)$$

Onde:

RQD: *Rock Quality Designation*;

J_n: Índice do número de famílias de descontinuidades;

J_r: Índice de rugosidade das descontinuidades;

J_a: Índice de alteração das paredes das descontinuidades;

J_w: Índice de influência da água subterrânea;

SRF: *Stress Reduction Factor*.

As principais estruturas singulares como diques, falhas e venulações, também foram levantadas, sendo utilizado um critério desenvolvido em Córrego do sítio para poder classificá-las de acordo com a sua qualidade. Tal critério é denominado RMRj (RMR adaptado para classificar somente as descontinuidades singulares) baseado nos parâmetros de classificação das descontinuidades (Tabela 1) e de presença de água (Tabela 2) do RMR (Bieniawski, 1989), sendo obtido pela soma destes fatores, conforme apresentado na equação 3.

$$RMRj = P_{cd} + P_w \quad (3)$$

Onde:

RMRj = Classificação RMR adaptada para classificar apenas a descontinuidades singulares (*joints* em inglês)

Pcd = somatório dos pesos relativos à condição das descontinuidades

Pw = peso relativo à presença de água

Tabela 1: Classificação geomecânica da condição das descontinuidades. Modificado de Hoek *et al.* 1995.

Parâmetro		Faixa de Valores				
Persistência	Intervalo	< 1m	1 - 3m	3 - 10m	10-20m	>20m
	Peso	6	4	2	1	0
Abertura	Intervalo	Nenhuma	<0.1mm	0,1 - 1mm	1 - 5mm	>5mm
	Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Intervalo	Muito Rugoso	Rugoso	Ligeiramente Rugoso	Quase Rugoso	Liso
	Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Intervalo	Nenhum	Duro, espessura < 5mm	Duro, espessura > 5mm	Mole, espessura < 5mm	Mole, espessura > 5mm
	Peso	6	4	2	2	0
Grau de Alteração	Intervalo	Não Alterada	Ligeiramente Alterada	Moderadamente Alterada	Muito Alterada	Em Decomposição
	Peso	6	5	3	1	0

Tabela 2: Classificação geomecânica da influência da água. Modificado de Hoek *et al.* 1995.

Parâmetro		Condições Gerais				
Presença de Água		Seco	Úmido	Molhado	Gotejamento	Fluxo Abundante
	Peso	15	10	7	4	0

Após a obtenção do RMRj as descontinuidades singulares foram divididas em faixas de qualidade de acordo com a Tabela 3. Foi utilizado também um esquema de cores, para que essa representação fosse mais visual.

Tabela 3: Classes de qualidade das descontinuidades singulares definidas pelo RMRj

Faixas de valores do RMRj	Classes	Esquema de Cores
> 40	I - Muito Boa	Verde
31 - 40	II - Boa	Amarelo
20.5 - 31	III - Razoável	Vermelho
7 - 20.5	IV - Ruim	Verde-escuro
0 - 7	IV - Muito Ruim	Vermelho-escuro

Através da compilação dos dados levantados em um banco de dados interno, foi possível obter a representação tridimensional da qualidade do maciço rochoso (Figura 2) e das

descontinuidades (Figura 3), podendo as mesmas variar de muito ruim a muito boa.

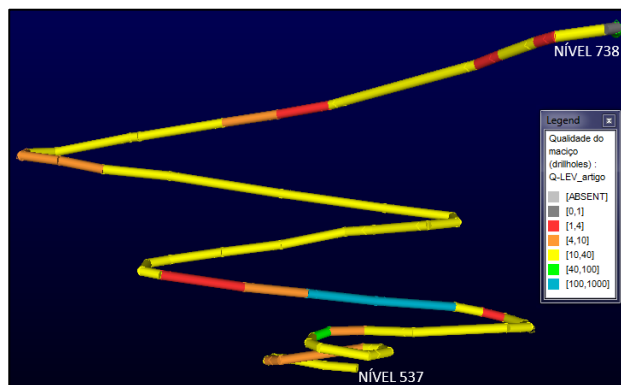


Figura 2: Rampa Laranjeiras. Qualidade do Maciço Rochoso.

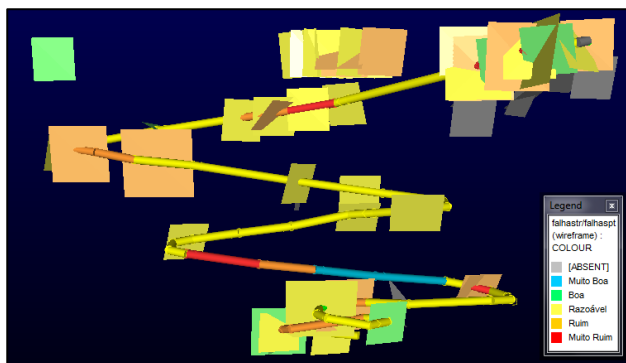


Figura 3: Rampa Laranjeiras. Qualidade das descontinuidades singulares.

2.2 Qualidade da Contenção

A qualidade da contenção foi avaliada tomando-se como base os limites pré-estabelecidos na mina Córrego do Sítio, levando em consideração o dimensionamento e a necessidade de suporte para garantir a estabilidade das aberturas subterrâneas.

O padrão de contenção que vem sendo aplicado varia de acordo com o tipo de escavação, conforme mostra a Figura 4.

Tipo de Escavação	Largura da Galeria	Tipo de Suporte	Comprimento (m)	Malha (m x m)	Ângulo Mínimo de Inclinação em relação à Horizontal (°)
Galerias Permanentes (Rampa, Travessa e demais escavações permanentes)	< 6m	Tirante resinado (tirante ovalizado 7/8" com chapa 150 x 150)	2.4	1.5 x 1.5	50
	entre 6 e 10m	Tirante resinado (tirante ovalizado 7/8" com chapa 150 x 150)	3.2		
	>10m	Variável: deverá ser avaliado e recomendado pela Mecânica de Rochas.			-
Galerias Temporárias (Galeria de Minério)	< 6m	Swellex	2.4	1.5 x 1.5	50
	entre 6 e 10m	Tirante resinado (tirante ovalizado 7/8" com chapa 150 x 150)	3.2		
	>10m	Variável: deverá ser avaliado e recomendado pela Mecânica de Rochas.			-
Interseções e Emboques	< 10m	Tirante resinado (tirante ovalizado 7/8" com chapa 150 x 150)	3.2	1.3 X 1.3	50
	>10m	Variável: deverá ser avaliado e recomendado pela Mecânica de Rochas.			-
Nichos de sondagem, subestações, transformador, paiol de explosivos e câmara de refúgio.	< 6m	Tirante resinado (tirante ovalizado 7/8" com chapa 150 x 150)	2.4	1.5 x 1.5	50
		Tela tipo "galinheiro" fixada com split-set	Fio 10 mm, abertura até 0,10 m fixada com split-set (0,40 m a 0,80 m)		-
	entre 6 e 10m	Tirante resinado (tirante ovalizado 7/8" com chapa 150 x 150)	3.2	1.5 x 1.5	50
		Tela tipo "galinheiro" fixada com split-set	Fio 10 mm, abertura até 0,10 m fixada com split-set (0,40 m a 0,80 m)		-
	>10m	Variável: deverá ser avaliado e recomendado pela Mecânica de Rochas.			-
Realces	Variável	Cabos de aço diâmetro 5/8" com sete tranças (com nutcage)	Variável (4,5 a 13,5 m)	Variável de acordo com as condições relativas à segurança e diluição	-

Figura 4: Padrão de contenção utilizado na mina Córrego do Sítio.

Dessa forma, para determinação da qualidade da contenção, foram atribuídas notas para a inclinação e malha dos tirantes em relação ao padrão requerido.

Essas notas são obtidas através de inspeções visuais, onde se faz necessário análises críticas sobre a orientação e malha da contenção aplicada, nessa avaliação também é considerando o histórico de rupturas ocorridas na mina de Córrego do Sítio.

Com o intuito de atribuir valores para qualidade da contenção, as notas são obtidas em forma de porcentagem (embora a avaliação seja feita de forma visual), sendo este valor o grau de aderência da malha e inclinação em relação ao

padrão de contenção. O resultado final da qualidade do suporte aplicado é representado pela média entre a porcentagem de aderência da malha e da inclinação dos tirantes.

Os intervalos de classificação para a qualidade da contenção variam de muito ruim a muito boa, sendo esses limites obtidos através do menor e maior valor de qualidade mensurando em campo (Tabela 4).

Tabela 4: Intervalos de valores para classificação da qualidade da contenção.

Faixas de valores (%)	Qualidade da Contenção	Esquema de Cores
90 - 100	Muito Boa	Blue
80 - 90	Boa	Green
70 - 80	Razoável	Yellow
60 - 70	Ruim	Orange
50 - 60	Muito Ruim	Red

Da mesma forma que na caracterização geomecânica do maciço, os dados levantados foram compilados em um banco de dados interno, sendo obtido posteriormente uma representação tridimensional da qualidade da contenção (Figura 5).

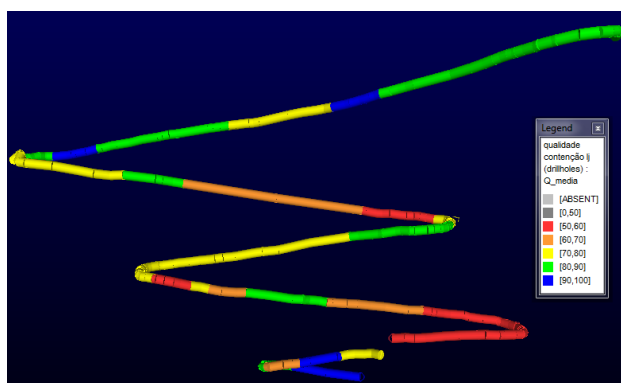


Figura 5: Rampa Laranjeiras. Qualidade da Contenção.

2.3 Definição dos Trechos Críticos

Sabe-se que a associação de fatores como baixa qualidade do maciço, qualidade da contenção, presença de estruturas singulares críticas, dimensões dos vãos, proximidade de detonações, assim como outros diversos fatores, são os responsáveis por mudar as condições iniciais do maciço, acarretando assim, em um aumento da probabilidade de desarticulações e rupturas.

Pensando nisso, para definição dos trechos considerados mais críticos ao longo de toda rampa Carvoaria, foi feita uma junção dos modelos de qualidade do maciço rochoso, das falhas e da contenção, levando em consideração também a geometria e orientação da rampa e a presença de realces próximos (Figura 6).

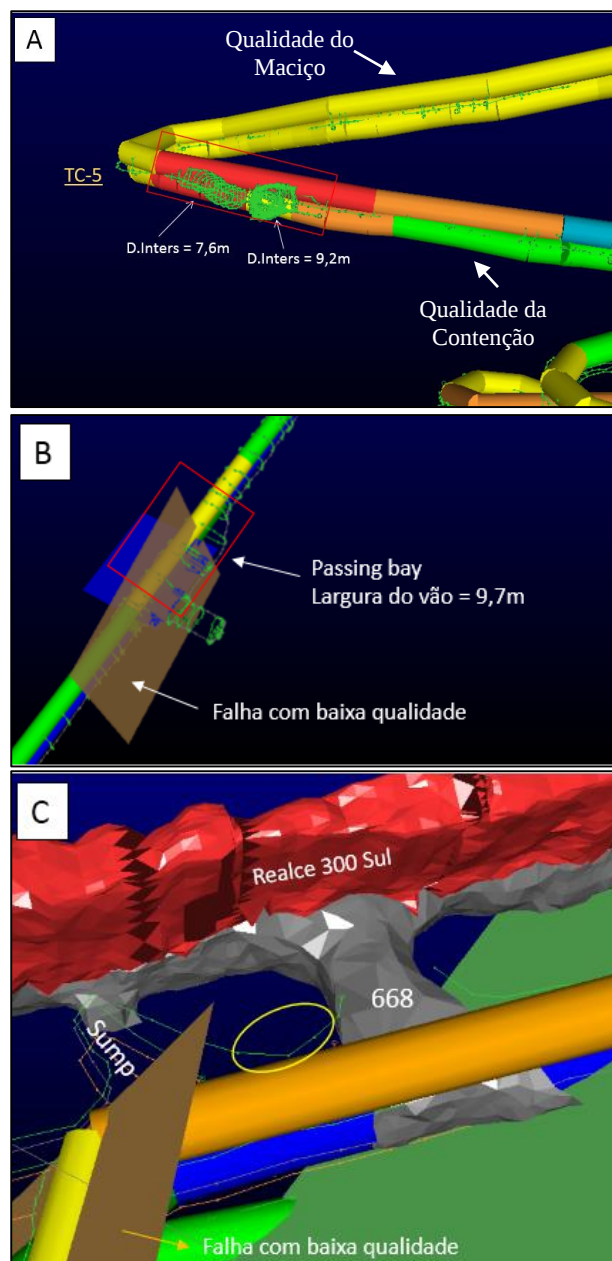


Figura 6: Indicação de alguns dos trechos considerados críticos. (a) Rampa Laranjeiras: Qualidade ruim tanto para o maciço rochoso quanto para contenção. (b) Rampa Carvoaria: Região de *passing bay* com presença de uma falha de baixa qualidade e maciço de qualidade intermediária. (c) Rampa Carvoaria: Pilar danificado devido à proximidade com a lavra.

2.4 Análise Cinemática

Após a identificação desses trechos, foi realizado um dimensionamento pelo método do equilíbrio-limite utilizando o *software Unwedge*, que simula as maiores cunhas tetraédricas formadas por descontinuidades ubíquas, para a definição do suporte a ser recomendado.

A avaliação foi realizada considerando estáveis as cunhas cujo fator de segurança, após

a instalação da contenção, foi maior ou igual à 1,5 (Hoek *et al.* 1995), uma vez que se trata de um acesso permanente.

As orientações adotadas para o cálculo das cunhas tetraédricas no *software Unwedge* correspondem às médias das descontinuidades mais persistentes observadas em cada região, juntamente com sua respectiva coesão (neste caso a coesão é igual a zero, pois está sendo considerado que as descontinuidades se encontram abertas) e ângulo de atrito, sendo este obtido através da seguinte fórmula (Norwegian Geotechnical Institute, 2013):

$$\Phi = \arctg(J_r/J_a) \quad (4)$$

Sendo:

Jr: Rugosidade das paredes das descontinuidades

Ja: Alteração das paredes das descontinuidades

Para as análises da rampa Carvoaria e Laranjeiras foi considerada a pior situação observada em campo, onde existe contato rocha-rocha e as paredes apresentam-se pigmentadas (Ja=1,0) com rugosidade plana lisa (Jr=1,0).

O valor de cada um desses parâmetros foi obtido de acordo com os trabalhos de Barton *et al.* (1974) in Hoek *et al.* (1995), que quando adicionados à fórmula, indicam ângulo de atrito igual a 45°.

Já os parâmetros adotados para a contenção, representada neste caso pelos tirantes e cabos, foram obtidos tendo como base as especificações do fabricante e testes de aderência realizados em Córrego do Sítio.

A seguir tem-se como exemplo uma das análises cinemáticas realizadas, simulando a maior cunha tetraédrica formada e o suporte necessário para contê-la (neste caso o reforço corresponde a tirantes de 3,2 metros em uma malha de 1,5 por 1,5) (Figura 7).

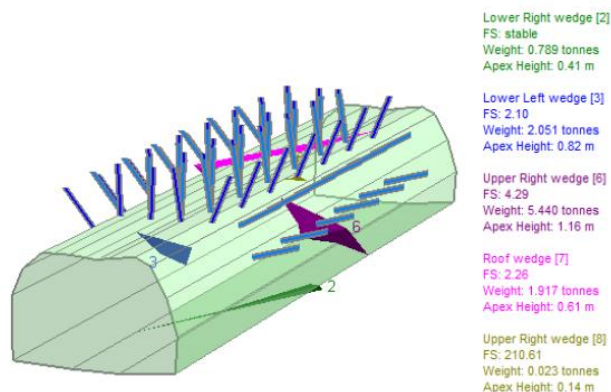


Figura 7: Análise cinemática de uma das regiões identificadas como crítica ao longo da rampa Carvoaria.

3 PLANO DE AÇÃO

Após a identificação dos trechos críticos e realização das análises cinemáticas para definir o suporte necessário como reforço, foi elaborado um plano de ação buscando priorizar regiões de acordo com os fatores de risco observados (Tabela 5 e 6). Essas ações foram planejadas em conjunto com as equipes de Operação e Planejamento de Mina.

Tabela 5: Plano de ação definido em conjunto pelas áreas de Mecânica das Rochas, Operação e Planejamento de Mina, para a Rampa Carvoaria.

Prioridade	Fatores de Risco	Recomendação
1ª	- Qualidade do Maciço - Galeria Paralela à Foliação - Proximidade de Realce	Remoção de bloco Reforço com tirante: comprimento 3,2m malha 1 X 1 m
2ª	- Presença de Falha de baixa qualidade - Qualidade do Maciço - Vão da galeria - Galeria Paralela à Foliação	Reforço com cabeamento: comprimento 4,5m malha 2 X 2 m Inclinação 90°
3ª	- Presença de Falha de qualidade média - Qualidade do Maciço - Vão da galeria - Galeria Paralela à Foliação	Reforço com tirante: comprimento 3,2m malha 1.5 X 1.5 m
4ª	- Qualidade do Maciço - Qualidade da Contenção - Vão da galeria - Galeria Paralela à Foliação	Reforço com tirante: comprimento 3,2m malha 1.5 X 1.5 m
5ª	- Presença de Falha de baixa qualidade - Qualidade do Maciço - Vão da interseção - Galeria Paralela à Foliação	Reforço com tirante: comprimento 3,2m malha 1.5 X 1.5 m

Tabela 6: Plano de ação definido em conjunto pelas áreas de Mecânica das Rochas, Operação e Planejamento de Mina, para a Rampa Laranjeiras.

Design. Oslo - Noruega.

Prioridade	Fatores de Risco	Recomendação
1ª	- Qualidade da Contenção - Qualidade do Maciço - Vão da galeria - Galeria Paralela à Foliação	Reforço com tirante de 3,2m e uma malha de 1,3 X 1,3 m
2ª	- Presença de Falha - Qualidade da Contenção - Galeria Paralela à Foliação	Reforço com cabeamento de 4,5m ao longo da falha
3ª	- Qualidade da Contenção - Vão da Galeria - Galeria Paralela à Foliação	Reforço com tirante de 3,2m e uma malha de 1,5 X 1,5 m
4ª	- Qualidade do Maciço - Qualidade da Contenção - Vão da Interseção - Galeria Paralela à Foliação	Reforço com tirante de 3,2m e uma malha de 1,3 X 1,3 m
5ª	- Qualidade da Contenção - Interseção	Reforço com tirante de 3,2m e uma malha de 1,3 X 1,3 m
6ª	- Qualidade da Contenção - Qualidade do Maciço	Reforço com tirante de 2,4m e uma malha de 1,5 X 1,5 m

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a realização dos trabalhos de campo e posteriormente ao se tratar e analisar esses dados coletados, foi possível perceber que a metodologia adotada para avaliação em conjunto dos principais fatores de risco da mina Córrego do Sítio que podem condicionar eventuais instabilizações, ou seja, a qualidade do maciço rochoso, de suas descontinuidades singulares, do suporte adotado considerando a geometria e orientação espacial da galeria, apresentou resultados bastante satisfatórios, uma vez que foi possível identificar e realizar o tratamento desses locais onde se tinha algum potencial de instabilização.

Conforme descrito anteriormente as ações foram realizadas conforme a sua criticidade. Entretanto ressalta-se que ao se identificar algum risco iminente esse era prontamente eliminado.

REFERÊNCIAS

- Barton, N. R. (1974). A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. *Norwegian Geotech. Inst. Publ. No. 105*. Oslo: Norwegian Geotech. Inst.
- Bieniawski Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications. *John Wiley & Sons*, New York, 251 pages.
- Hoek, E. K. (1995). Support of Underground Excavations in Hard Rock. *Netherlands: A.A. Balkema*.
- Norwegian Geotechnical Institute. (2013). Using the Q-system - Rock Mass Classification and Support