

Proposta de aplicação de modelo de risco geotécnico no plano de produção da mina Pilar, Ero Brasil Caraíba

Daniel Santos de Santana

Coordenador de Geotecnia, Ero Brasil Caraíba, Jaguarari, Brasil, daniel.santana@erobr.com

Lucas Renan Mendes Machado

Engenheiro Geotécnico Sênior, Ero Brasil Caraíba, Jaguarari, Brasil, lucas.machado@erobr.com

Selton de Oliveira Lima

Graduando em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, selton.lima@ufpe.br

RESUMO: O planejamento de produção de uma mina subterrânea envolve primariamente o projeto de mina em conjunto com o sequenciamento das operações mineiras necessárias para a continuidade da extração do bem mineral de maneira segura e sustentável. Para que o plano de produção possa atingir um grau aceitável de previsibilidade e assertividade, é necessário que o projeto e sequenciamento estejam baseados em parâmetros robustos que possam atender às especificidades do depósito explotado. Nesse contexto, é necessário identificar, avaliar e quantificar os riscos intrínsecos ao plano de forma que sejam tomadas as devidas ações mitigadoras. Sob o ponto de vista geotécnico, o risco se relaciona com os diferentes mecanismos de instabilidade presentes ao longo da vida útil planejada para as escavações e que podem trazer impactos significativos para o sucesso do plano. Dessa forma é necessário fazer com que a disciplina de geotecnia esteja presente de maneira efetiva na formação do plano de produção de médio prazo atuando para quantificar e avaliar o risco geotécnico relacionado às operações subterrâneas. Para isso, foi proposta a aplicação de um modelo de blocos tridimensional que integra dados geotécnicos (classificação de maciço, tensões *in-situ*, dados estruturais) em conjunto com parâmetros de projeto e de sequenciamento de lavra e enchimento. Em posse desses dados e com base na retroanálise de realces lavrados, foram formulados critérios para definição de risco geotécnico de realces que resultaram na definição do perfil de risco geotécnico do plano de lavra da mina Pilar, Ero Brasil Caraíba.

PALAVRAS-CHAVE: Mineração subterrânea, Risco geotécnico, Modelo de blocos, Análise de médio prazo.

ABSTRACT: The production planning of an underground mine primarily involves mine design along with the sequencing of mining operations necessary for the continuous extraction of the mineral resource in a safe and sustainable manner. For the production plan to achieve an acceptable level of predictability and accuracy, it is necessary for the design and sequencing to be based on robust parameters that can address the specificities of the exploited deposit. In this context, it is necessary to identify, assess, and quantify the intrinsic risks to the plan so that appropriate mitigating actions can be taken. From a geotechnical standpoint, risk is related to the various instability mechanisms present throughout the planned lifespan of excavations, which can have significant impacts on the success of the plan. Therefore, it is necessary to ensure that the discipline of geotechnics is effectively incorporated into the formation of the medium-term production plan, working to quantify and assess the geotechnical risk related to underground operations. To achieve this, the application of a three-dimensional block model has been proposed, integrating geotechnical data (rock mass classification, *in-situ* stresses, structural data) along with design and sequencing parameters for mining and backfilling. With these data and based on the retro-analysis of mined orebodies, criteria were formulated to define the geotechnical risk of orebodies, resulting in the definition of the geotechnical risk profile of the mining plan for the Pilar, Ero Brazil Caraíba mine.

KEYWORDS: Underground mining, Geotechnical risk, Block model, Medium-term analysis.

1 INTRODUÇÃO

O risco é uma variável presente em todas as esferas da realidade, seja no âmbito econômico, profissional ou ambiental. No entanto, é crucial aprender a conviver com ele e compreendê-lo para encontrar maneiras eficazes de contorná-lo. Nesse sentido, a análise de riscos torna-se uma prática essencial em empreendimentos que buscam quantificar os riscos presentes em planos de produção. Essa abordagem visa simplificar as complexidades técnicas, transformando-as em indicadores compreensíveis, que podem ser utilizados no gerenciamento de planos e processos decisórios. Na operação de minas subterrâneas, a análise de riscos desempenha um papel fundamental na garantia da segurança dos trabalhadores, na preservação das escavações e na sustentabilidade das operações. A natureza intrinsecamente desafiadora e complexa da atividade mineradora torna imperativo antecipar e mitigar potenciais riscos associados. Além disso, tal análise contribui para a eficiência operacional. Ao antecipar possíveis obstáculos, as empresas podem ajustar seus planos de produção, aprimorar processos e otimizar o uso de recursos, resultando em uma operação mais eficiente e rentável. Um modelo de risco geotécnico consiste na compilação de dados abrangentes relacionados aos parâmetros de projeto e às características inerentes do local. Esses parâmetros, derivados do momento de criação do plano de produção, e as características específicas do local, como a geologia do maciço rochoso, são cuidadosamente analisados para formar uma representação compreensiva dos potenciais desafios geotécnicos que podem ser enfrentados durante a execução do projeto (BASSON e DU PLOOY, 2020).

A mina Pilar é situada no Vale do Curaçá, ao norte da Bahia, no distrito de Pilar, pertencente ao município de Jaguarari. O desenvolvimento do modelo de avaliação de risco geotécnico foi concretizado em concordância com a elaboração do planejamento de produção a médio prazo. Sua aplicação visa proporcionar resultados que contribuam para o delineamento e projeto das atividades de lavra dos realces, assegurando, concomitantemente, o devido reconhecimento, atenção e gestão adequada das áreas de maior vulnerabilidade geotécnica dentro da mina subterrânea (BROCKMAN *et al.*, 2019; ANM, 2022).

2 OBJETIVOS

O modelo de risco geotécnico desempenha papel crucial ao possibilitar a compreensão e gestão dos riscos associados ao plano de produção. Utilizando uma abordagem simplificada, busca-se a visualização do risco geotécnico contido nas lavras dos realces a partir de modelos tridimensionais. O uso dessa metodologia busca não apenas oferecer uma visão mais clara dos fatores potenciais de insucesso do plano de médio prazo, mas também visa desenvolver perfis de risco geotécnico específicos para cada projeto da mina. Tais perfis são ferramentas informativas importantes para tomadas de decisões variadas, que possibilitam o corpo técnico antecipar e executar com mais aderência o plano de produção.

3 MINA PILAR

A Mina Pilar é uma mina subterrânea de mais de 1400m de profundidade, localizada abaixo da antiga cava a céu aberto. Em consequência da grande proporção a mina é subdividida em diferentes projetos (Figura 1). Os projetos da mina podem ser vistos na figura a seguir.

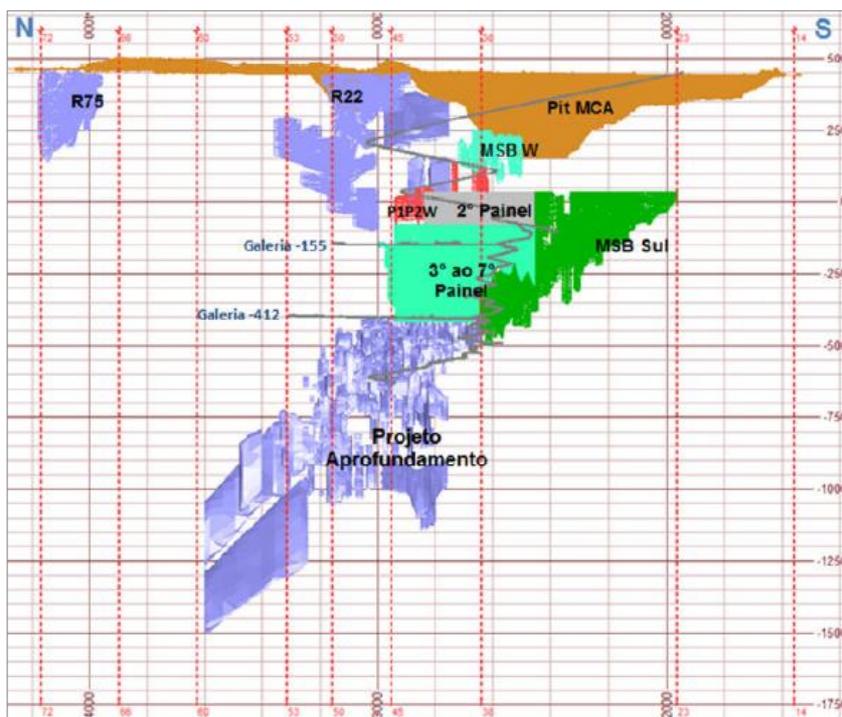


Figura 1. Layout dos projetos da mina subterrânea (FREITAS, 2016)

O método de lavra aplicado na mina atualmente é o *Vertical Retreat Mining* (VRM), com a aplicação de enchimento com pasta (*paste fill*) e/ou com rocha estéril (*rock fill*), a lavra ocorre de modo ascendente, com realces classificados entre primários, secundários e terciários. Para aplicação do método, os realces primários começam a serem lavrados, após conclusão estes devem ser preenchidos com enchimento a critério, com a finalização e estabilização do enchimento é iniciada a lavra dos realces secundários, após mesmo processo, é dado início a lavra dos terciários (FREITAS, 2016).

Na figura 2, pode ser visualizado o padrão de sequenciamento esquemático do método de lavra da mina.

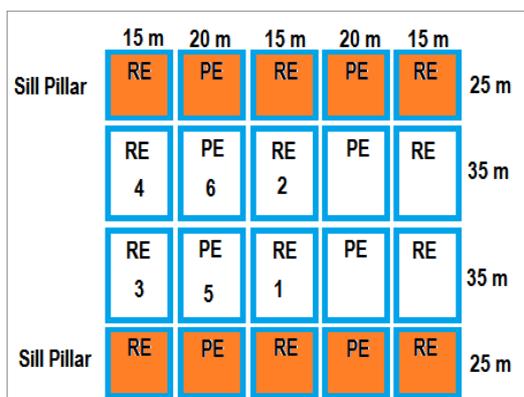


Figura 2. Desenho esquemático da sequência de lavra (ANDRADE FILHO, 2002).

4 FATORES DE RISCO GEOTÉCNICO

No âmbito do planejamento de mina, os fatores de risco geotécnico são elementos que podem contribuir para a ocorrência de eventos indesejados em uma mina, que podem acarretar, em alguns casos, a paralisação temporária dos ciclos de operações e por conseguinte implicar negativamente no cumprimento do plano de produção. Eles são identificados através de um processo de análise dos principais determinantes que influenciam as escavações mineiras. Os principais fatores que serão considerados na estrutura da proposta de modelo de risco incluem aspectos estruturais, de dimensionamento de lavras, impactos na infraestrutura, sequenciamento de enchimento e fatores operacionais.

4.1 Fator estrutural (F_{EST})

Descontinuidades de escala regional como zonas de falha, podem afetar a estabilidade das escavações subterrâneas aumentando o risco de instabilidades em realces de lavra e induzir desde pequenas sobreescavações até o colapso do vão. Para este trabalho, foi utilizado o modelo tridimensional da zona de falha principal (FREITAS, 2016), posteriormente detalhado por Santana e Tomé (2022). O cálculo do risco geotécnico associado a essa estrutura consistiu no levantamento da menor distância entre o realce avaliado e o sólido do modelo tridimensional da falha a partir do software GEM4D.

4.2 Fatores de dimensionamento (F_{DIM})

Nos critérios de dimensionamento foram explorados os parâmetros geométricos dos realces que compõem o plano de produção a partir de dois eixos principais: primeiro foi analisar a condição da estabilidade das faces das escavações dos realces depois de lavrados, e o segundo a estabilidade dos pilares horizontais (*sill pillar*) formados após a lavra (Figura 2).

4.2.1 Estabilidade e design dos realces

Para análise da estabilidade das escavações conforme as dimensões propostas, foi empregado o Método Empírico do Gráfico de Estabilidade Modificado, Potvin (1988). Esse método incorpora em sua curva a relação entre o N' (número de estabilidade), responsável por representar a qualidade do maciço rochoso da região do realce analisado, e o HR (raio hidráulico), responsável por demonstrar os critérios de geometria do realce. O cálculo do N' , que pode ser visto na equação 1, é executado utilizando uma variedade de parâmetros, são eles: Índice Q' , *Tunneling Quality Index* modificado (HOEK *et al*, 1995), utilizado para avaliar a qualidade do maciço rochoso em projetos de túneis e escavações subterrâneas. Conforme a equação 2, o Índice Q' utiliza o RQD, *Rock Quality Designation* (DEERE, 1968), calculado dividindo-se a soma dos comprimentos dos trechos de rocha com mais de 10 cm por todo o comprimento do intervalo amostrado, do número de famílias de fraturas, J_n , da rugosidade das descontinuidades, J_r , e do grau de alteração das descontinuidades, J_a . Fator A, razão das tensões induzidas paralelas à face do realce, que variam de acordo com a profundidade, tensão máxima induzida e resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; Fator B, considera a orientação relativa de estruturas que podem promover rupturas em relação à face analisada do realce; Fator C, relaciona-se ao efeito gravitacional, que influencia na queda dos blocos do teto e deslizamento de blocos das paredes da escavação. Para aplicar o gráfico de estabilidade, também é essencial calcular o raio hidráulico (HR) da face escolhida, que é determinado pela divisão da área da face do realce pelo seu perímetro, como pode ser visto na equação 3 (POTVIN, 1988).

$$N' = \text{Índice } Q' \times \text{Fator A} \times \text{Fator B} \times \text{Fator C} \quad (1)$$

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (2)$$

$$HR = \frac{\text{Área da face}}{\text{Perímetro da face}} \quad (3)$$

Na figura 3 pode-se ver o gráfico correlacionando o número de estabilidade (N') com o raio hidráulico (HR) da face em estudo, delineando zonas que podem ser consideradas estáveis, instáveis ou em risco de colapso (POTVIN, 1988).

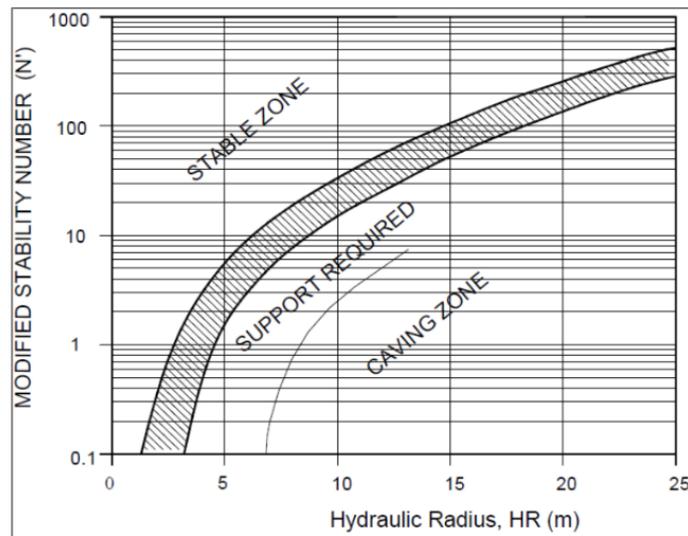


Figura 3. Gráfico de estabilidade modificada para os realces propostos (POTVIN, 1988)

4.2.2 Estabilidade dos pilares horizontais

Na análise da estabilidade dos pilares horizontais foi utilizada a Classificação de Resistência de Pilares em Minas de Rocha Dura utilizando a Fórmula do Confinamento, proposto por Lunder & Pakalnis (1997). Neste método a resistência do pilar é avaliada por meio de relações empíricas entre a largura e altura do pilar e a resistência do maciço rochoso. O método demonstra a resistência do pilar utilizando-se de dois termos, um que representará a resistência do maciço rochoso *in-situ* (*size*) e outro que considerará a influência da variação da geometria do pilar em sua resistência (*shape*). A fórmula do confinamento, apresentada na equação 6, é utilizada para determinação da resistência do pilar (P_s), nela são empregadas constantes empíricas e duas variáveis, são elas: o *Uniaxial compressive strength* (UCS), essa é a resistência à compressão não confinada do material íntegro do pilar. Já a outra variável é o *Mine pillar friction term* (κ), termo de atrito do pilar, este se assemelha ao efeito de aumentar o ângulo de atrito de um material e é determinado pelo *Average pillar confinement* (C_{pav}), que pode ser visto na equação 4 e relaciona a razão entre largura (w) e altura (h) do pilar para obtenção de seu confinamento médio. À medida que o confinamento aumenta, o valor aparente do termo de atrito diminui, esta relação pode ser observada na equação 5 (LUNDER e PAKALNIS, 1997).

$$C_{pav} = 0,46 \times \left[\log \left(\frac{w}{h} + 0,75 \right) \right]^{\frac{1,4}{(w/h)}} \quad (4)$$

$$\kappa = \tan \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right] \quad (5)$$

$$P_s = \text{Size} \times \text{Shape} = (0,44 \times \text{UCS}) \times (0,68 + 0,52 \times \kappa) \quad (6)$$

A figura 4 apresenta o gráfico de estabilidade dos pilares utilizando a Fórmula do Confinamento, delineando zonas que podem ser consideradas estáveis, instáveis ou ruptura (LUNDER e PAKALNIS, 1997).

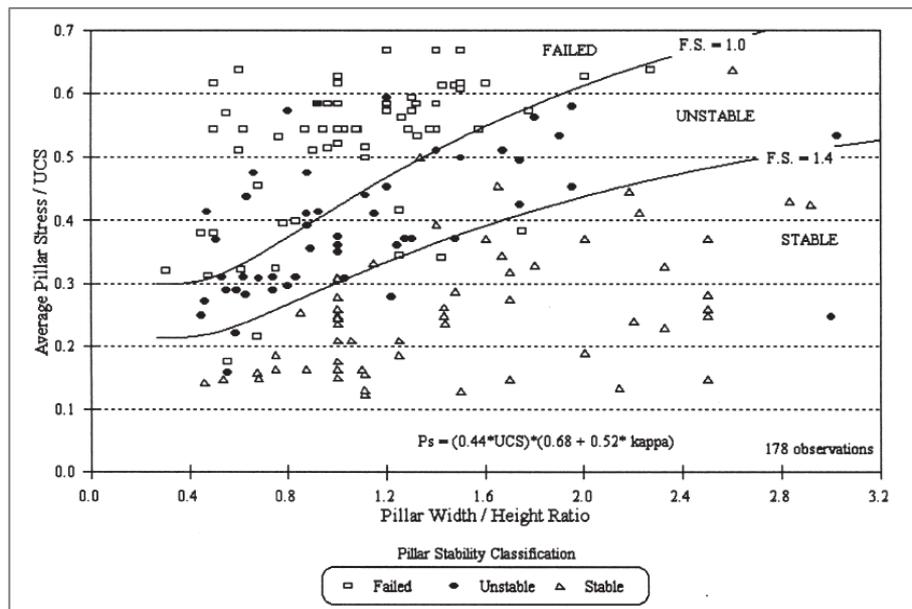


Figura 4. Gráfico de estabilidade de pilares com relação largura/altura (LUNDER e PAKALNIS, 1997)

4.3 Fatores operacionais (F_{OP})

4.3.1 Influência nas vias de acesso

As rampas desempenham papel fundamental como as principais vias de acesso na mina. Oferecendo acesso contínuo e gradual entre os diferentes níveis, facilitando o transporte eficiente de veículos, equipamentos e pessoas de um nível a outro. Além disso, as rampas servem como rotas para a instalação de serviços essenciais, como sistemas de ventilação, cabos elétricos, tubulações de água e drenagem, garantindo o funcionamento adequado das operações.

Considerando a importância das rampas de acesso na mina Pilar, um fator crucial levado em conta foi a distância relativa entre os realces propostos e essas vias principais. Esse fator foi avaliado levando em conta a possibilidade de dano às contenções de acessos principais a partir das vibrações geradas pelos desmontes de lavra e o impacto gerado pela necessidade de reparo no sistema de reforço e suporte de superfície dessas galerias.

4.3.2 Infraestrutura

De maneira similar às vias de acesso, o risco a algumas escavações de infraestrutura foram avaliadas observando o potencial dano por vibrações geradas na detonação de realces. Um dos principais problemas decorrentes desse impacto é o potencial instabilidade dos poços, que podem representar um risco significativo à continuidade das operações mineras devido à qualidade da ventilação nas frentes de serviço.

4.3.3 Limpeza dos realces

Para garantir a eficácia da limpeza dos realces após o desmonte, são utilizados pontos de carregamento, conhecidos como *draw points*, nos quais as carregadeiras operadas remotamente podem acessar as escavações de forma adequada para remover o minério. Ao analisar os riscos associados a esse processo, considerou-se o comprimento do realce em relação ao número de pontos de carregamento planejados. Realces com dimensões maiores do que o esperado e apenas um ponto de carregamento planejado apresentam menor produtividade e efetividade durante a limpeza devido à grande distância que as carregadeiras precisam percorrer dentro das escavações de lavra. Essa situação aumenta a probabilidade de atrasos na operação e possíveis danos ao equipamento, quebrando o fluxo de produtividade.

4.3.4 Sequência de enchimento

Na mina Pilar, em decorrência de seu método de lavra, um dos fatores mais importantes é a devida atenção a sequência de enchimento dos realces lavrados. Como dito anteriormente, no método de lavra utilizado, após conclusão das lavras dos realces primários, estes devem ser preenchidos. Para determinar o risco associado ao enchimento, foi avaliada a dependência do enchimento entre realces sequenciados no plano de produção levando em conta a necessidade da recuperação de pilares verticais entre lavras (*rib pillars*) utilizando enchimento auto-portante (*pasta*), ou enchimento com estéril de realces abertos realizar a lavra de realces ascendentes.

5 MATRIZ DE RISCO

Para cada parâmetro de risco geotécnico avaliado foi determinado um número relativo à Probabilidade (P) de ocorrência da consequência gerada por aquele risco. Sendo assim, o Risco para cada Realce (R_R) foi calculado a partir da soma de cada fator, conforme equação 7.

$$R_R = F_{EST} + F_{DIM} + F_{OP} \quad (7)$$

O valor de R_R foi correlacionado com a chance de insucesso do projeto de cada realce, ou seja, a probabilidade de baixa aderência da lavra ao plano de produção, conforme tabela 1.

Tabela 1. Classificação da Probabilidade (P)

Risco total	Probabilidade (%)	Classificação
>20	80 - 100	(5) Quase certo
15 - 20	60 - 79	(4) Provável
12 - 15	40 - 59	(3) Possível
6 - 11	5 - 39	(2) Improvável
0 - 5	<5	(1) Raro

O Impacto (I) da baixa aderência da lavra avaliada foi definido com base na relevância do projeto de realce em termos do metal equivalente a uma quantidade de dias no plano de produção conforme tabela 2.

Tabela 2. Classificação de Impacto (I)

Dias de produção	Classificação
0 - 6	(1) Insignificante
6 - 15	(2) Baixo
15 - 30	(3) Moderado
30 - 90	(4) Alto
>90	(5) Principal

Para construção da matriz de classificação de risco foram colocadas as dimensões de Probabilidade (P) e Impacto (I), definindo assim uma matriz 5x5 contendo 25 níveis de risco:

		Impacto (I)					Classe	Nível de risco
		Classificação	Raro	Improvável	Possível	Provável		
Probabilidade (P)	Principal	11	16	20	23	25	21 to 25	Alto
	Alto	7	12	17	21	24		
	Moderado	4	8	13	18	22	13 to 20	Significativo
	Baixo	2	5	9	14	19		
	Insignificante	1	3	6	10	15	6 to 12	Médio
						1 to 5	Baixo	

Figura 5. Matriz de risco geotécnico

7 CONCLUSÕES

A abordagem integrada de diferentes parâmetros de risco geotécnico aliada à visualização tridimensional dessas variáveis no contexto de planejamento de mina tem se mostrado eficaz para a proposição de medidas que possam reduzir o risco e aumentar a aderência dos planos de produção no curto prazo. Essa técnica proporciona uma análise expedita dos maiores riscos associados ao plano de lavra e resulta em uma maneira simplificada, porém efetiva, de direcionar o corpo técnico para a solução de problemas futuros de forma antecipada. Para aplicar esse conceito na avaliação do plano de produção, foi necessário entender o histórico de ocorrência de instabilidades e, desse modo, definir quais métodos de análise de estabilidade podem ser empregados para atender às necessidades específicas da operação avaliada. Isso tem sido crucial para identificar e lidar com os fatores ao longo das rotinas de planejamento de mina subterrânea, garantindo uma abordagem proativa para mitigar problemas potenciais e aproveitar oportunidades de flexibilização do plano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Mineração (2023). Anuário Mineral Brasileiro: *principais substâncias metálicas*. Brasília.
- Andrade Filho, H. R. Aumento da recuperação de lavra da mineração caraíba. In: II Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Mina Subterrânea, Jaguarari, 14p., 2002.
- Barton, N., Lien, R. & Lund, J. (1974) *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Rock Mechanics. Vol.6, n. (4), pp.189-236.
- Basson, F., Du Plooy, D. (2020) *From Block Model to Risk Model*. Disponível em: <<https://basrock.co/pptx/20200810%20From%20Block%20Model%20to%20Risk%20Model%20RevB.pptx>>. Acesso em: 10 mar. 2024
- Brockman, M., Gosche, K., Du Plooy, D. (2019) The role of the geotechnical model for rapid integration in managing operational geotechnical risk. In: MGR 2019: Proceedings of the first international conference on mining geomechanical risk. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019.
- Bieniawski, Z.T. (1989) - *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons publ., New York, USA. 251p.
- Santana, D., Tomé, J.G., (2022) atualização do modelo estrutural 3d da mineração caraíba e a relação com os projetos de longo e curto prazo. In: Anais do XX COBRAMSEG. Campinas. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/atualizacao-do-modelo-estrutural-3d-da-mineracao-caraiba-e-a-relacao-com-os-proj?lang=pt-br>> Acesso em: 12 Abr. 2024.
- Deere, D. U. (1968). *Rock Mechanics in Engineering Practice. Geological considerations*. (eds. Stagg and Zienkiewicz), London: John Wiley and Sons, pp. 1-20.
- FREITAS, J.P. *Elaboração do Modelo Geomecânico Tridimensional para a reavaliação e setorização geotécnica dos realces da Mineração Caraíba, 2016*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Ouro Preto.
- Hoek, E. & Brown, E. T., (1980). *Underground Excavations in Rock*. In: Institution of Mining and Metallurgy. London, UK, 527p.
- Lunder, P. J., Pakalnis, R. C. (1997) *Determination of the strength of hard-rock mine pillars*. v. 90, n. 1013, p. 51–55.
- Potvin, Y. (1988) *Empirical stope design in Canada*. Ph.D. thesis, Department of Mining and Minerals Processing, University of British Columbia, Canadá.