

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Calibração da Curva de Estabilidade para o Dimensionamento de Realces do Aprofundamento da Mineração Caraíba

Daniel Santos de Santana

Engenheiro Geotécnico Pleno, Mineração Caraíba, Jaguarari, Brasil, daniel.santana@minacaraiba.com

Jih Horng Liu

Engenheiro Geotécnico Júnior, Mineração Caraíba, Jaguarari, Brasil, jih.liu@minacaraiba.com

RESUMO: A mineração subterrânea realiza a abertura de grandes escavações inseridas no corpo de minério, conhecidas como realces. A estabilidade dessas escavações está diretamente relacionada ao contexto geotécnico e às dimensões adotadas, sendo esses parâmetros influenciadores na segurança das operações, manutenção da estabilidade global da mina, controle de diluição operacional e produtividade de lavra. O dimensionamento de realces, a critério de projeto, é conduzido a partir do método empírico mundialmente conhecido como curva de estabilidade. A calibração da curva visa propor as dimensões máximas adequadas para o projeto de lavra de acordo com as características geotécnicas locais. Este trabalho tem como objetivo demonstrar os resultados obtidos a partir da calibração da curva empírica de estabilidade proposta por Potvin para o projeto do aprofundamento da Mineração Caraíba, onde foram estabelecidos os critérios de estabilidade baseados no contexto de diluição operacional através do uso de escaneamento dos realces. Ao todo foram utilizados 33 realces lavrados entre os anos de 2019 e 2021, os quais se classificam como estáveis aqueles com raios hidráulicos (RH) inferiores a 5.5, e instáveis os que possuem raios hidráulicos acima de 7.5 para um valor médio do número de estabilidade (N') de 8.9.

PALAVRAS-CHAVE: Curva empírica de estabilidade, Mineração Caraíba S/A, Calibração, Mineração subterrânea.

ABSTRACT: Underground mining develops large excavations within the ore body, known as stopes. The excavation stability is directly related to the geotechnical context and stope dimensions; these parameters influence the operation's safety, maintenance of the mine's global stability, operational dilution control and mining productivity. The stope dimensioning, as the project design criteria, is conducted using the empirical method worldwide known as the stability chart. The chart calibration aims to propose the maximum stable span for mining project, according to the local geotechnical characteristics. This paper aims to demonstrate the results obtained from the calibration of the empirical stability chart proposed by Potvin, for the deepening project of Mineração Caraíba, which the stability criteria were established based on the context of operational dilution using CSM. A total of 33 mined stopes between 2019 and 2021 were used, classified as stable those with hydraulic radius (RH) below 5.5, and unstable those with hydraulic radius above 7.5 for an average value of the stability number (N') of 8.9.

KEYWORDS: Empirical stability chart, Caraíba Mine S/A, Calibration, Underground mine.

1 Introdução

A Mineração Caraíba S/A é uma empresa produtora de concentrado de cobre localizada no Distrito de Pilar, pertencente ao município de Jaguarari localizado no interior do Estado da Bahia, a 385 quilômetros da capital Salvador. Atualmente sua produção de minério é de 2,30 milhões de toneladas anual, desse total, cerca de 1,32 milhões de toneladas são oriundos da mina subterrânea de Pilar. A nível nacional, a sua produção representa 10,72% de todo cobre produzido no país, conferindo à Mineração Caraíba a quarta posição dentre as maiores produtoras de cobre do Brasil (ANM, 2020).

Atualmente a mina subterrânea Pilar encontra-se a 1500 metros de profundidade, na qual a rampa principal já ultrapassa a cota -1017 metros, onde se tem o emboque do nível mais profundo. Dentre as diversas frentes e estratégias de expansão e aumento da produção de minério para os próximos anos, destaca-se o projeto



de aprofundamento da mina, onde a taxa de produção atual é de 36% e deve representar 72% de toda a produção da Mina Pilar no ápice em 2026.

Nesse contexto, a redefinição das dimensões dos realces, através da calibração da curva empírica de estabilidade para o projeto do aprofundamento torna-se de suma importância para garantir a estabilidade das escavações, o controle de índices de *overbreak* na lavra que possa assegurar melhores performances e menor custo de transporte de estéril e a segurança operacional durante a atividade de lavra.

2 Objetivo

A calibração da curva de estabilidade segue uma metodologia empírica que exige a retroalimentação de dados até que sejam representativos para o contexto geotécnico local. Essa metodologia tem importância na redução de ocorrências de instabilidades em grandes escavações e controle de diluição operacional, possibilitando otimizar a recuperação do minério lavrado. Esse estudo tem por objetivo dimensionar o vão máximo estável que assegure maior segurança às atividades de lavra, conciliando com a crescente demanda por aumento da taxa de produção para os próximos anos, possibilitando assim colaborar para índices de *overbreak* controláveis pelas dimensões dos realces.

3 Aspectos teóricos sobre a curva empírica de estabilidade

A composição da curva de estabilidade é uma metodologia empírica proposta por Potvin (1988), que leva em consideração os seguintes fatores: N' (número de estabilidade) e o RH (Raio Hidráulico), da qual essa relação foi apresentada inicialmente por Mathews *et al.* (1981) baseado em 26 casos históricos, e posteriormente recalibrado por Potvin (1988) com base em 175 casos históricos de 34 minas. Dos fatores utilizados para a composição gráfica, o raio hidráulico está relacionado à geometria do realce, utilizado para representar forma e tamanho da escavação, tendo seu conceito introduzido por Laubscher & Taylor (apud CHARBEL, 2015), no qual pode ser calculado através da equação (1). Já o N' representa a qualidade e condição do maciço onde será lavrado o realce, sendo obtido através da equação (2), cujos parâmetros são: o Q de Barton modificado (Q') (Mathews *et al.* apud Potvin, 1988), obtido por meio da equação (3); as tensões induzidas paralelamente à face do realce (fator A) que depende da profundidade, tensão máxima induzida e resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; a orientação relativa de estruturas penalizadoras que podem causar ruptura em relação à face analisada do realce (fator B); e o efeito gravitacional que influenciará no modo de queda dos blocos (fator C). Os fatores A, B e C podem ser obtidos graficamente ou por meio de equações definidas a partir dos gráficos desenvolvidos, conforme ilustrados na figura 1. Tratando-se de um método empírico, a sua construção considera experiências adquiridas de escavações anteriores que iniciam com a caracterização geomecânica do maciço (CHARBEL, 2015).

$$RH = \frac{\text{Área de face}}{\text{Perímetro da face}} \quad (1)$$

$$N' = Q' \times A \times B \times C \quad (2)$$

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (3)$$

No qual,

RQD: parâmetro relacionado à qualidade da rocha, cujo cálculo é feito somando os trechos maiores do que 10 cm, dividido pelo comprimento do intervalo amostrado;

J_n : Número de famílias de fraturas;

J_r : Rugosidade da descontinuidade, descreve a textura das principais descontinuidades;

J_a : Alteração da descontinuidade, descreve a alteração e resistência à fricção das principais descontinuidades;

O critério de estabilidade introduzido por Clark (1998) e Pakalnis (1995), por sua vez, caracteriza-se por associar condições de estabilidade a estimativas de valores para a diluição não planejada, esta denominada como deslocamento (*overbreak*), que é toda quebra que ocorre além dos limites do realce planejado, podendo



ocorrer a contaminação por estéril ou um aumento do teor final devido a existência de minério acima do teor de corte no material deslocado, resultante da imprecisão inerente ao modelo geológico.

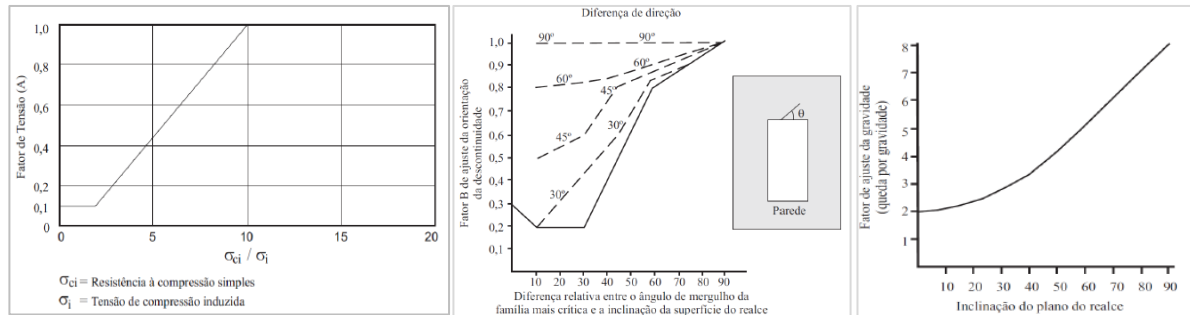


Figura 1: Gráficos utilizados para estimativa do fator A (à esquerda), fator B (no centro), e fator C (à direita).

4 Contexto do Aprofundamento da Mina Pilar

Os realces lavrados atualmente para o projeto do aprofundamento, o qual tem seu início a partir do nível -537, possuem alturas de 35 metros, onde é empregado o método de lavra *Vertical Retreat Mining* (VRM) que consiste em dois níveis onde são desenvolvidas duas galerias de acesso ao realce, sendo uma na parte superior e a outra na parte interior, no qual geralmente é empregada a perfuração ascendente com furos longos de 3.5'', e descendente de 3.5'', 4.5'' ou 6.5''.

Os realces planejados possuem em média 83° de inclinação, tendo em vista o comportamento verticalizado das lentes de minério da Mina Pilar. Em alguns casos, essa inclinação chega a 90 graus. A figura 2 ilustra os níveis e realces do projeto do aprofundamento, assim como a verticalidade devido ao corpo de mineralizado.

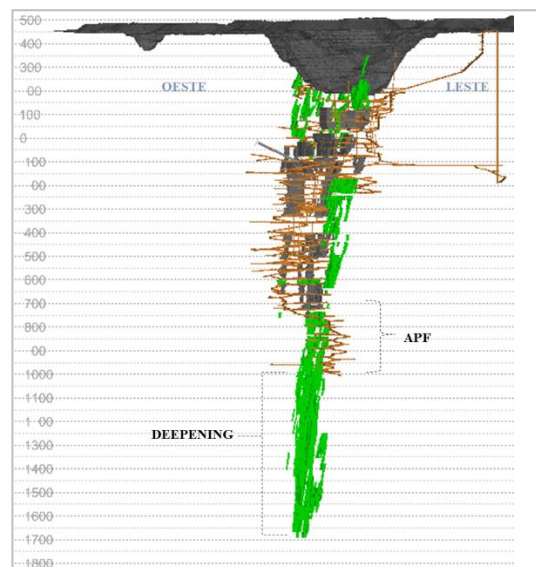


Figura 2: Sólidos dos realces de longo prazo para o projeto do aprofundamento da mina de Pilar.

4.1 Caracterização geomecânica do maciço rochoso

O maciço rochoso da Mina Pilar no aprofundamento possui um baixo grau de fraturamento, podendo ser verificado através dos furos de sondagem. A predominância litológica para a sua encaixante é o gnaíse, de resistência a compressão uniaxial da rocha de 162 Mpa, conferindo a ela características de um maciço bastante competente. A figura 3 ilustra algumas fotos representativas de caixas de testemunhos de sondagem do maciço rochoso da mina subterrânea de Pilar. Em alguns casos são observadas ocorrências de *disking* no



hanging wall da mineralização, que é caracterizado como um fenômeno espontâneo em que porções de testemunhos de rochas de caráter rúptil se quebram em forma de “discos” ou “pastilhas” durante e após o processo de sondagem diamantada em áreas de alta tensão (Tropia, 2015).



Figura 3: Representação típica do maciço encaixante da mina subterrânea, furos FC5148, FC46155 e FC4897 referentes ao *Hanging Wall* dos realces 21PRE15F1, 25PRE11F1 e 20PPE11F1, respectivamente.

5 Metodologia

A metodologia de calibração da curva empírica de estabilidade deu início com a coleta de dados de realces planejados e escaneados no aprofundamento da mina, entre os painéis 16 e 25. Através dessas informações de escaneamento dos realces, foram processados no GEM4D, software de gerenciamento de informações geotécnicas pertencente à Basrock, os volumes de *overbreak* por face. Ainda durante essa etapa de avaliação dos escaneamentos, foram desconsiderados para a análise os realces que apresentaram incertezas relativas às causas de seus *overbreaks*, podendo estar relacionadas à resultados induzidos por desmontes ou decorrente de *underbeak* exacerbado, influenciados por questões operacionais dos quais não são contemplados na metodologia proposta por Potvin (1988). Ao todo, o estudo considerou 33 realces validados a partir dessa análise.

Foram ainda coletadas informações referentes às dimensões das faces para cálculo do raio hidráulico, utilizando a equação (1). Para a investigação do N' foram feitas avaliações dos furos de sondagem via fotografia, no entorno de 5 metros do limite do realce planejado nas proximidades do *hanging wall* (Villaescusa, 2014), conforme ilustrado na figura 4 para fins de cálculo do RQD.

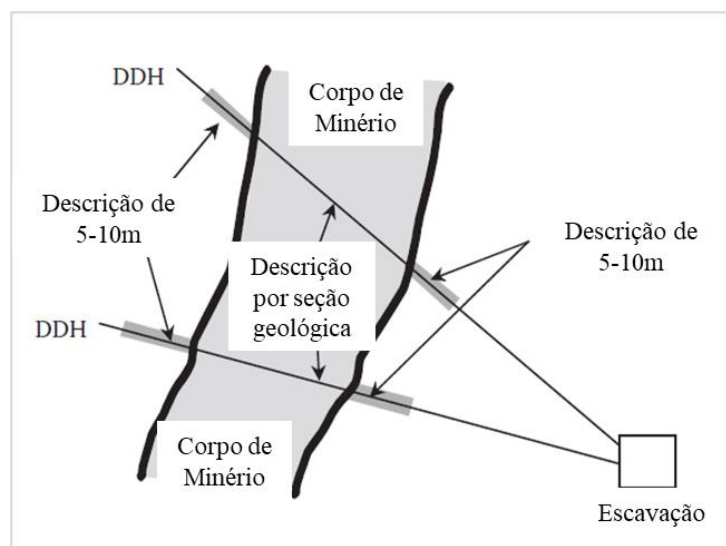


Figura 4. Intervalo de descrição do RQD (modificado de Villaescusa, 2014).

Ao todo foram avaliados 88 furos de sondagem, 60,2% dos furos analisados possuem um RQD (*Rock Mass Index*) para o *Hanging Wall* entre 90% e 100%, e 86,4% com RQD acima de 80%, indicando um grau de fraturamento muito baixo, conforme pode ser verificado na figura 5.

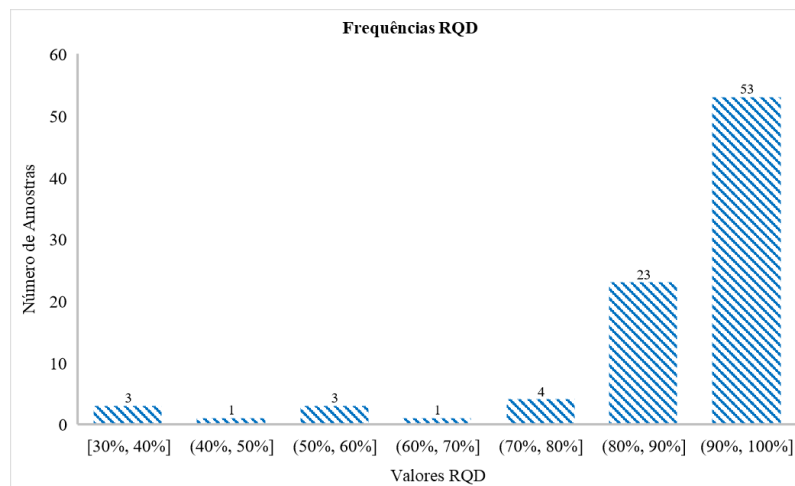


Figura 5. Distribuição de frequências do RQD.

Os valores dos demais parâmetros para o cálculo do Q' foram obtidos a partir de um banco de dados de mapeamento geomecânico com uma extensa quantidade de informações de características das superfícies de descontinuidades, assim como o número de famílias levantadas. Sendo assim, os valores para *Joint Number Set* (J_n), *Joint Rough Number* (J_r) e *Joint Alteration Number* (J_a), verificados na tabela 1 representam respectivamente duas famílias de estruturas, juntas onduladas-rugosas e descontinuidades levemente alteradas sem preenchimento de material mole.

Tabela 1. Valores adotados para os parâmetros do Q de Barton.

Parâmetros	Valores para o Q de Barton
J_n	6
J_r	2
J_a	2

Os fatores relativos às tensões, estrutural e gravitacional (A , B e C), respectivamente, foram obtidos por tradução das equações através dos gráficos, onde se coletou informações referentes a orientação do *hanging wall* (*dip/ dip direction*), profundidade da escavação e verificação do comportamento de quebra referente às condições estruturais a partir dos escaneamentos utilizando ferramentas de medição do GEM4D. Com os valores obtidos do Q' , fator A , fator B e fator C , é possível calcular o número de estabilidade (N') de cada um dos realces analisados, conforme indicado pela equação (2).

A equação obtida de correlação do *overbreak* total e o *overbreak* da face foi utilizada para definir o critério de estabilidade, baseado na metodologia do Clark e Pakalnis, conforme figura 6. Por fim, criou-se uma correlação entre o *overbreak* do *hanging wall* com o *overbreak* total, com confiabilidade de 83,3%, sugerindo que essa é a face controladora de ruptura dos realces. Sendo assim, via equação proposta, definiu-se que um *overbreak* de 7% no *hanging wall* corresponde a 15% do *overbreak* total do realce para o limite estável, e que um *overbreak* no *hanging wall* de 14% corresponde a 30% ao *overbreak* total para o limite instabilidade. A figura 6 demonstra a correlação verificada entre o *overbreak* total e o *overbreak* do *hanging wall*.

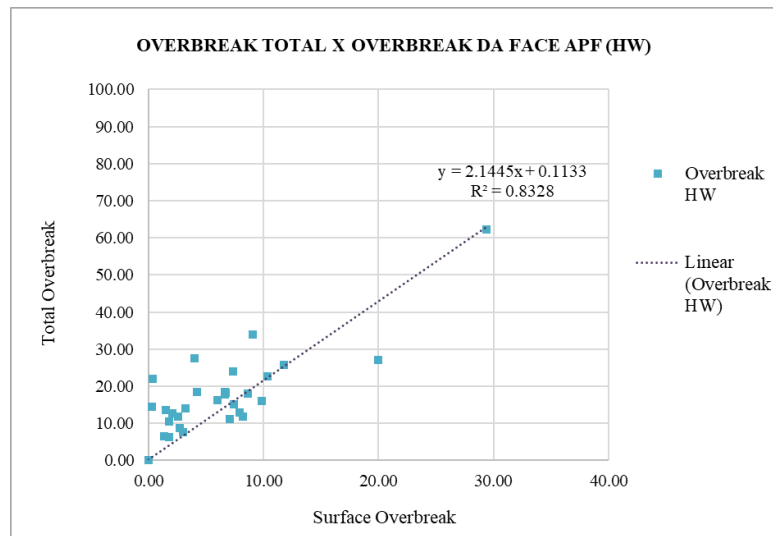


Figura 6. Correlação do *overbreak* total com a sobre quebra do *Hanging Wall* dos realces analisados.

5 Resultados e discussões

Ao todo foram considerados 33 realces lavrados entre os anos de 2019 e 2021. Após a calibração, foi possível observar que os limites de estabilidade são semelhantes aos limites da literatura, proposto por Potvin (1988), conforme ilustrado na figura 7. Em comparação com os raios hidráulicos propostos por Freitas (2016), que variava entre 7,3 e 8,1 metros, a atual calibração indica a necessidade de redução em cerca de 24,7% o raio hidráulico dos realces a fim de garantir sua estabilidade para o aprofundamento da mina.

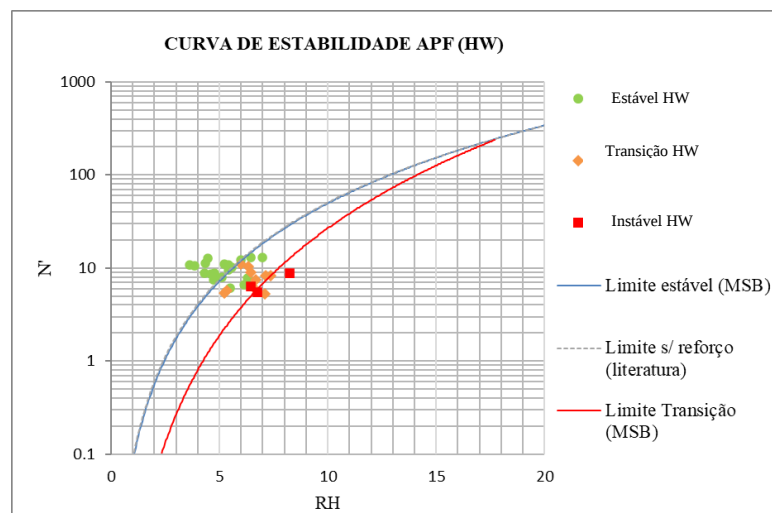


Figura 7. Gráfico da curva empírica de estabilidade para o projeto do aprofundamento da Mineração Caraíba S/A.

Na medida em que mais dados são analisados e inseridos, é possível que ocorra um ajuste dos limites de estabilidade, principalmente devido à maior influência das tensões que serão cada vez mais relevantes no comportamento do *overbreak*, com consequências nos resultados de lavra à medida que a mina aprofunda. Nota-se que o limite de estabilidade e instabilidade sugere que o raio hidráulico mínimo corresponde a 5.5 e o máximo é de 7.5 para uma média de N' correspondente a 8.9. Tais informações sugerem que, para a altura dos painéis adotados atualmente até o nível N-965 de 35 metros, a dimensão recomendada em comprimento no *strike* dos realces deve ser de 15 metros, visando obter um índice de *overbreak* inferior a 15%. A altura de 35 metros dos painéis requer que a perfuração dos realces ocorra de forma ascendente e descendente ou, em alguns



casos, totalmente descendente com diâmetros de 4.5” ou 6.5”, executado pelo equipamento Cubex. Nas situações de perfuração totalmente descendente, o peso da coluna das hastes, a depender do ângulo de inclinação dos furos, pode influenciar na ocorrência de desvios de perfuração, consequentemente gerando sobre quebras nas faces dos realces. Além disso, a falta de automação do equipamento também torna os controles de rotação e avanço da perfuração limitadas às habilidades do operador. Esses fatores podem colaborar para uma menor performance em termos de índice de *overbreak* dos realces. Portanto, visando alinhar os conceitos geotécnicos aos operacionais e de planejamento de lavra, com manutenção dos índices de *overbreak* e, tendo em vista a influência cada vez maior das tensões com o aprofundamento da mina, sugeriu-se reduzir os painéis para 26m, mantendo um raio hidráulico entre 5.5 e 7.0, para corpos de potência de até 15m e acima de 15m, respectivamente, o que representa um comprimento no *strike* entre 20 e 30m.

6 Conclusões e considerações finais

A calibração da curva de estabilidade deve ser realizada de forma contínua, a partir da atualização da magnitude das tensões atuantes, obtidas com ensaios de tensão *in situ*, com os avanços das melhores práticas operacionais de desmonte e perfuração, como também a partir do desenvolvimento de modelos numéricos que possam melhor orientar o entendimento dos parâmetros de definição da curva de estabilidade (Fator A). Os resultados obtidos a partir da calibração possibilita uma definição do vão máximo estável sem suporte com base no histórico de lavra do ambiente local, sendo assim uma prática mais confiável que a aplicação do gráfico original de Potvin (1988). A sugestão da redução da altura dos painéis, além de proporcionar possibilidade de melhores resultados de lavra em termos de *overbreak* em consequência direta da maior acertabilidade da perfuração, proporciona geometrias mais favoráveis ao estado de estabilidade do vão, uma vez que as dimensões entre altura e comprimento tenderão a valores similares. A Figura 8 demonstra que quanto mais próximo de 1 for a relação entre a altura e comprimento, mais estáveis serão os realces.

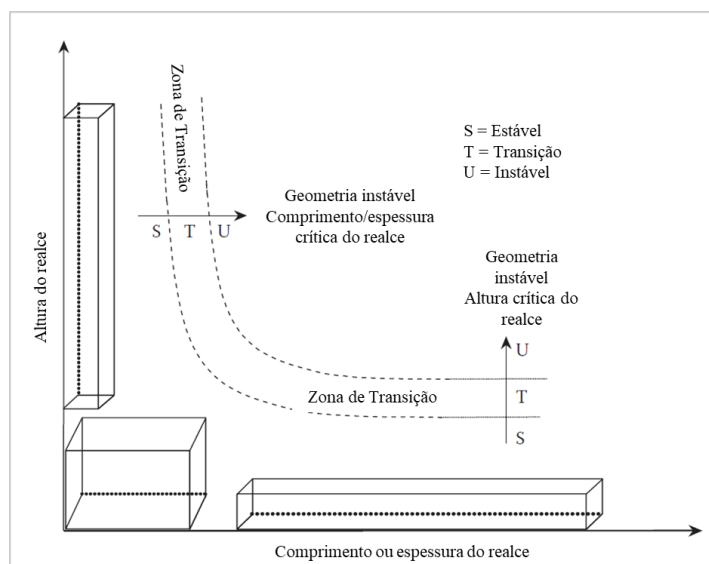


Figura 8. Influência da relação entre altura e comprimento de realces na sua estabilidade (modificado de Villaescusa, 2014).

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Mineração Caraíba pelo apoio e oportunidade no desenvolvimento de trabalhos ligados à geotecnia de mina subterrânea. Agradecemos também à Gerência de Planejamento de Mina, que vem prestando todo apoio através da integração das áreas de geotecnia e planejamento de mina.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Mineração (2020). Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas. Versão 1. Brasília.
- Barton, N. (2015) *Using the Q System: Rock massa classification and support design*. Handbook, NGI, Oslo, Norway.
- Charbel, P. A. (2015) *Gerenciamento de risco aplicado à diluição de minério*. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- Clark, L. M. (1998) *Minimizing dilution in open stope mining with focus on stope design and narrow vein longhole blasting*. Ph.D. thesis, Department of Mining and Mineral Process Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canadá.
- Freitas, J. P. S. (2016) *Elaboração do modelo geomecânico tridimensional para a reavaliação e setorização geotécnica dos realces da Mineração Caraiíba*. Dissertação - Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.
- Pakalnis, R., Poulin, R., and Hadjigeorgiou, J. (1995). *Quantifying the cost of dilution to underground mines*. Mining Engineering, 47(12): 1136–1141.
- Potvin, Y. (1988) *Empirical stope design in Canada*. Ph.D. thesis, Department of Mining and Minerals Processing, University of British Columbia, Canadá.
- Teixeira, J. B. G. et al. (2010) *Modelos de Depósitos de Cobre do Brasil e sua Resposta ao Intemperismo, Chapter: IV*. Editors: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, p.71-95, jan. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/317496788_IV-DEPOSITOS_DE_COBRE_DO_VALE_DO_RIO_CURACA_BAHIA>. Acessado em: 02 fev. 2020.
- Tropia, I. R., Figueiredo, R. P. (2015) *Análise das tensoes in situ na Mina Cuiaba-Sabara-Minas Gerais-Brasil*. In: ISRM Regional Symposium-8th South American Congress on Rock Mechanics. OnePetro.
- Villaescusa, E (2014). *Geotechnical design for sublevel open stoping*. Australia: Western Australian School of Mines.