

## ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS EM ROCHA - ESTUDO DE CASO DE MINERAÇÃO

*Data de submissão: 08/05/2023*

*Data de aceite: 02/06/2023*

### **Diogo Peixoto Cordova**

Universidade Federal do Pampa –  
UNIPAMPA  
Caçapava do Sul – RS  
<http://lattes.cnpq.br/2354744565105719>

### **Andre Cezar Zingano**

Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul – UFRGS  
Porto Alegre – RS  
<http://lattes.cnpq.br/9534063417527053>

**RESUMO:** Processos de instabilidade em escavações subterrâneas, em maciços rochosos, produzem diversos riscos de segurança para a operação. Principalmente quanto a danos físicos e ambientais, além do aumento de custos. Buscando a diminuição dessas instabilidades, novas ferramentas como a modelagem numérica de problemas, tem sido amplamente utilizada de forma a otimizar os projetos e as definições quanto ao suporte a ser utilizados para estabilização das escavações. O estado tensional também precisa ser estudado e compreendido em cada cenário, pois a elevada concentração de tensões, assim como a ausência (relaxamento) de tensões, também produz situações de instabilidades.

O contato abrupto entre maciços rochosos de diferentes propriedades elásticas e de resistência, também exigem um cuidado extra, no momento do dimensionamento do suporte das escavações. Um estudo de caso abordando o problema de instabilidade em uma mina subterrânea é mostrado. No exemplo foram criados modelos numéricos a partir da variação dos parâmetros de entrada, até que o resultado correspondesse a realidade existente. A partir destes modelos calibrados com a realidade, foi então possível propor otimizações e melhorias no projeto das galerias subterrâneas. Essas pequenas mudanças mostraram-se efetivas na diminuição da instabilidade e diluição do minério, durante a análise dos modelos numéricos.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelagem numérica, otimização, estado tensional, segurança da operação.

### STABILITY ANALYSIS OF UNDERGROUND EXCAVATIONS IN ROCK – MINING CASE STUDY

**ABSTRACT:** Instability processes in underground rock excavations produce several safety risks for the operation, especially in terms of physical and

environmental damage in addition to increased costs. Seeking to reduce these instabilities, new tools as numerical modeling, have been widely used to optimize projects and definitions regarding the roof support of excavations. The tensional state of the scenario also needs to be understood, as both high stress concentration and low stress (relaxation) also produce instability. The abrupt contact between rock masses with different elastic and strength properties also requires extra care when choosing roof support. A case study is shown addressing the instability problem in an underground mine. In the example, numerical models were created, from the variation of the input parameters until the result corresponded to reality. From these calibrated models, it was possible to propose optimizations and improvements in the design of underground galleries. These small geometry changes proved effective in reducing the instability and dilution of the ore during the analysis of the numerical models.

**KEYWORDS:** numerical modelling, optimization, stress state, operation safety.

## 1 | INTRODUÇÃO

Na mineração subterrânea as instabilidades ocorrem de forma mais ou menos controlada, uma vez que cada método de lavra possui uma diluição esperada no momento da produção do minério. O impacto econômico do aumento da diluição está distribuído no aumento de diversos custos da operação, ocasionando um desperdício na capacidade total de processamento do bem mineral. Dessa forma, manter uma baixa diluição é um fator muito importante tanto para o sucesso econômico quanto para a segurança da operação.

Como medida primordial, se faz necessário quantificar as diluições existentes em cada estudo de caso. Os métodos empíricos para o dimensionamento de escavações ainda são amplamente utilizados. Porém, o crescente uso de modelos numéricos permite que estes sejam capazes de representar a realidade do problema, em termos de resposta do maciço rochoso quanto a zonas de deformação, ruptura e conseqüentemente de instabilidade e de diluição. Isto por si só justifica o uso desses modelos numéricos como ferramenta de otimização para os projetos, comprovando que pequenas alterações de desenho podem colaborar com a diminuição de instabilidades e da diluição não planejada, no método de lavra considerado.

### 1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar a instabilidade de escavações subterrâneas, com auxílio de modelagem numérica. Como objetivos específicos destacam-se:

- Entender os mecanismos de instabilidade, além dos métodos disponíveis para cálculo da diluição, utilizando dados provenientes do escaneamento das câmaras;
- Revisar os parâmetros utilizados para o maciço rochoso e as tensões assumidas para criação do modelo numérico;

- Criar modelos numéricos que representem o cenário real dos problemas analisados;
- Verificar, por meio dos modelos numéricos calibrados, os efeitos de determinadas modificações no desenho de lavra com objetivo de diminuir a diluição;

## 2 | ESTADO DA ARTE

### 2.1 Caracterização geomecânica

Os sistemas de classificação geomecânica dos maciços rochosos são sistemas empíricos. Com a utilização desses sistemas pode-se obter parâmetros geotécnicos específicos ou até mesmo dimensionar escavações subterrâneas, em função das características de autossuporte dos maciços.

As classificações são incorporadas no estudo geomecânico como uma importante ferramenta para a caracterização do maciço rochoso e para a correlação de dados de entrada para o dimensionamento e a verificação do comportamento da escavação subterrânea (usando métodos numéricos ou analíticos).

Brady e Brown (2005) referem que os sistemas populares de classificação usados atualmente incluindo o GSI, o Sistema Q e o RMR, são baseados na determinação de pesos para o maciço rochoso dentro de uma faixa de valores, e que podem ser usados, também, para a estimativa da necessidade de suporte. Escavações de mesma ordem são agrupadas em regiões onde o processo de escavação e a necessidade de suporte são essencialmente parecidas.

### 2.2 Tensões naturais

As tensões naturais, também chamadas de tensões *in situ*, primitivas ou tensões virgens, são as tensões que existem na rocha sem haver nenhum distúrbio. No geral, as tensões *in situ* atuantes em um determinado maciço rochoso são produto de eventos cumulativos na história geológica. Um maciço rochoso pode ter sofrido vários ciclos de processos geológicos físico-químicos, térmicos e mecânicos sendo que todos esses fatores contribuíram para as tensões *in situ*, alguns influenciando mais do que outros (AMADEI; STEPHANSSON, 1997). As tensões *in situ* controlam a distribuição e magnitude das tensões ao redor das escavações subterrâneas, como em túneis, minas, poços e cavernas (HOEK; BROWN, 1980).

Em geral, os problemas de estabilidade relacionados as tensões, aumentam com a profundidade, mas também podem ser encontrados em escavações de baixa profundidade (0 a 200 m) devido as altas tensões *in situ* horizontais. A distribuição e magnitude das tensões *in situ* afetam a geometria, forma, dimensionamento, sequência de escavação e orientação das escavações subterrâneas (AMADEI; STEPHANSSON, 1997).

Em geral, estimar as tensões *in situ* requerem uma caracterização detalhada da geologia do local e um julgamento adequado. Uma prática comum é fazer duas considerações quando se está estimando as tensões em uma determinada profundidade,  $z$ , em um maciço rochoso. A primeira consideração é a de que o estado de tensões pode ser descrito por duas componentes: uma vertical ( $\sigma_v$ ) devido ao peso da rocha da cobertura naquela profundidade, calculada pela equação 1, (onde  $\gamma$  é o peso específico médio da rocha em MN/m) e uma componente horizontal ( $\sigma_h$ ) calculada pela equação 2. A outra consideração é a de que ambas tensões  $\sigma_v$  e  $\sigma_h$  são tensões principais (AMADEI; STEPHANSSON, 1997).

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (1)$$

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v \quad (2)$$

### 2.3 Modelos numéricos

A principal aplicação dos modelos numéricos em projetos de escavação, é fornecer uma análise da estimativa de alterações na tensão, deformação e deslocamentos induzidos pelo processo de escavação. Tais informações são um guia para a avaliação da estabilidade, segurança e economia de projetos e planejamento de escavações subterrâneas ou a céu aberto. Pariseau (1993), Brady e Brown (2005) e Jing e Hudson (2002) apresentam os princípios básicos de aplicações de elementos finitos em análise de tensões e deformações em aberturas subterrâneas. Em geral a metodologia adotada para modelagem numérica pode ser resumida nos seguintes tópicos:

- a) Definir o objetivo da análise: O modelador precisa ter uma ideia clara do que esperar como resultado de saída da análise;
- b) Preparação do modelo: O modelo precisa ser uma representação simples da realidade ao mesmo tempo que deve garantir que todos os detalhes essenciais estejam presentes;
- c) Verificação do programa: Para gerar confiança nos resultados é preciso primeiro realizar verificações comparando modelos simples com soluções já existentes;
- d) Dados de entrada e condições de contorno: Os parâmetros de entradas devem ser inseridos, como propriedades dos materiais, geometrias e as condições de borda do problema. A utilização de estágios (*stages*) permite verificar de forma rápida a redistribuição de tensões após cada umas das escavações, segundo sua sequência de extração;
- e) Definição da malha: Uma malha adequada deve ser definida e discretizada com um número de elementos capaz de representar todos os detalhes do problema;
- f) Executar e calibrar o modelo: Resultados são comparados com medidas de campo e o modelo deve ser recalibrado para corresponder essas medidas;
- g) Interpretação dos resultados: Uma interpretação correta dos resultados depende

da experiência e conhecimento do modelador.

Em resumo as principais etapas de criação dos modelos numéricos são descritas na Figura 1 abaixo.



Figura 1 - Sequência de criação do modelo numérico. Fonte: Autoria própria

## 2.4 Tensões e instabilidades

Durante a escavação das galerias de acesso existem pontos cruciais onde ocorrem grandes alterações nas tensões induzidas. Um desses pontos é justamente no contato entre a galeria inferior de acesso ao *stope* (*undercut*) com a parede do *hangingwall*. Neste ponto há uma interrupção da continuidade das tensões no *hangingwall*, produzindo uma zona de relaxamento de tensões onde as tensões são próximas a zero e tangenciais a parede da câmara. Wang (2004) examinou esse efeito causado pelo *undercut* verificando sua influência na estabilidade das paredes (Figura 2).

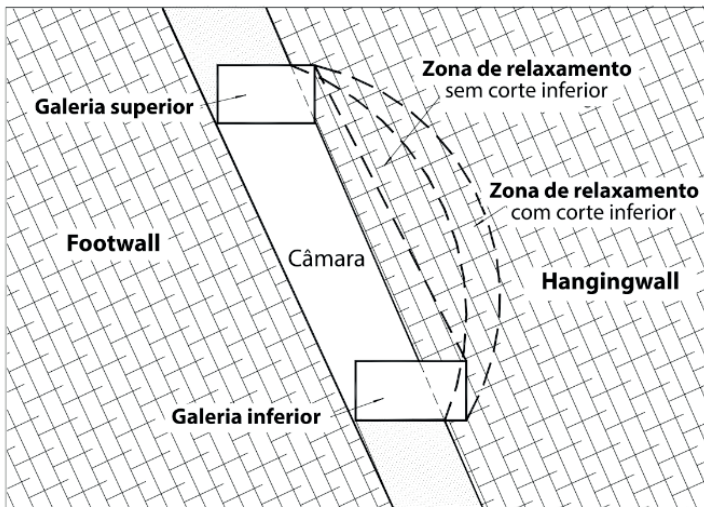


Figura 2. Esquema ilustrativo da influência da zona de relaxamento em uma câmara aberta

A diluição no *hangingwall* é resultado do relaxamento de tensões do maciço rochoso. Ela é definida como uma redução no estado de tensões paralelo à parede da escavação. Em outras palavras, a diluição ocorre quando a tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) é igual ou menor a zero (Martin et al, 1999).

Clark e Pakalnis (1997) desenvolveram a classificação ELOS (equação 3) com o

objetivo de obter valores linearizados da diluição, permitindo uma comparação direta entre diferentes situações.

$$ELOS = \frac{V_{OB}^S}{A_S} * 100 \quad (3)$$

Onde  $V_{OB}^S$  é o volume do *overbreak*, e  $A_S$  é a área da superfície exposta do *hangingwall*. A Tabela 1 a seguir demonstra os intervalos de valor ELOS e o nível de instabilidade esperada.

ELOS	Observação
< 0.5m	Instabilidade causada somente pelo desmonte
0.5m – 1m	Instabilidade leve
1m – 2m	Instabilidade moderada
> 2m	Instabilidade excessiva

Tabela 1. Intervalos de valores ELOS.

### 3 | ESTUDO DE CASO

O estudo de caso a seguir apresentado encontra-se publicado com maior nível de detalhe, no trabalho de Cordova (2016). Este estudo de caso de mineração compreende uma mina localizada na cidade de Minas de Corrales, no norte do Uruguai, departamento de Rivera, cerca de 70km ao sul da fronteira internacional com o Brasil e 450km ao norte da capital do Uruguai, Montevidéu. Alguns depósitos principais estão localizados na região de Minas de Corrales. Inicialmente um desses depósitos foi lavrado a céu aberto, sendo posteriormente lavrado de forma subterrânea, objeto de estudo deste trabalho.

A Ilha forma uma janela de rochas pré-cambrianas que se estendem ao longo de cerca de 110 km por 30 km de largura máxima. (Figura 3). Ela é caracterizada por um embasamento integrado principalmente por rochas metamórficas, que variam entre fácies xistos verdes até granulito, com intrusões graníticas associadas.

O método de lavra Câmaras Transversais foi utilizado para extrair a zona mineralizada de maior dimensão. O método de Câmaras Transversais é uma variação transversal do método *Sublevel Stope*, que consiste em extrair o minério formando grandes câmaras abertas separadas por sub-níveis de acesso ao longo da direção de maior continuidade do corpo mineralizado.

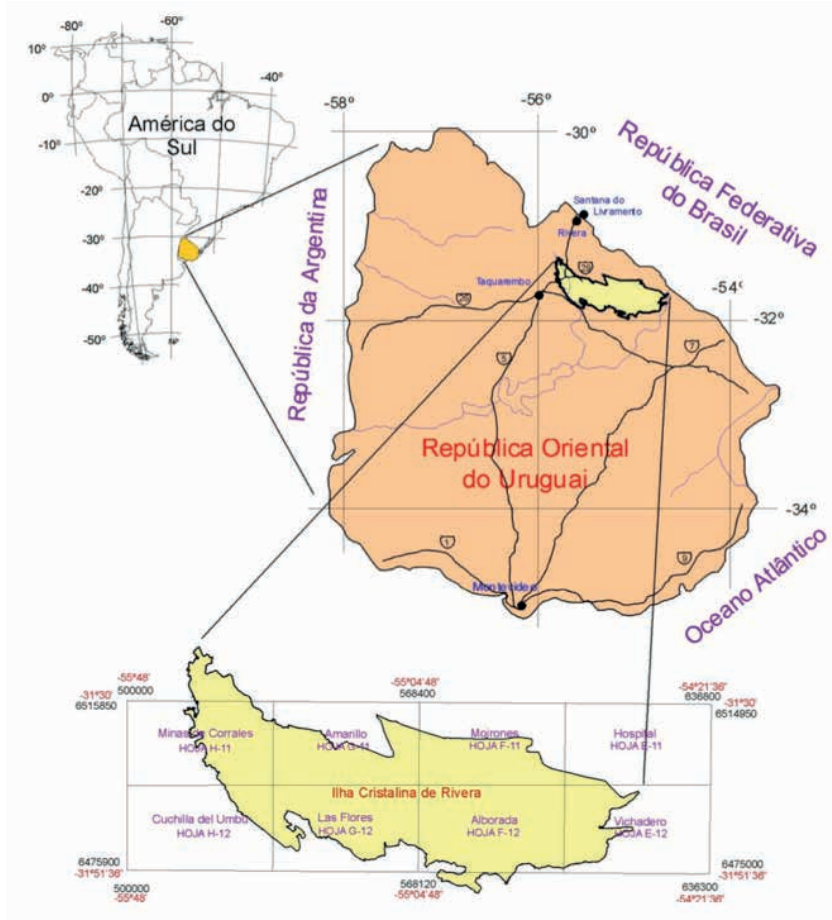


Figura 3 - Mapa de localização da área. Fonte: Quadros, 2000.

### 3.1 Propriedades geomecânicas

As propriedades geomecânicas das distintas unidades litológicas que formam o maciço rochoso, foram estimadas principalmente com base nas informações provenientes dos ensaios de laboratório e demais dados relevantes.

As unidades do maciço rochoso foram caracterizadas seguindo o critério generalizado de Hoek-Brown (HOEK; CARRANZA-TORRES; CORKUM, 2002), o qual define a resistência do maciço rochoso como uma envoltória de ruptura não linear, conforme demonstra a equação 4.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4)$$

Onde:

- $\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$ , as tensões efetivas principais maior e menor;

- $m_j$ , parâmetro associado a inclinação da envolvente de ruptura da rocha;
- $\sigma_{ci}$ , resistência a compressão uniaxial da rocha intacta;
- $GSI$ , índice de resistência geológica;
- $D$ , é um fator dependente do grau de perturbação do maciço rochoso por efeito do dano produzido pelo desmonte e o relaxamento das tensões. Para as estimativas apresentadas foi considerado um valor igual a 0 o que corresponde a maciços rochosos *in situ* não alterados ou a túneis com desmonte controlado e dano mínimo no maciço rochoso.

No caso dos valores de  $m_j$ , estes foram estimados a partir dos resultados dos ensaios triaxiais, uniaxiais e de tração. Foi utilizado o software Roclab para extrapolar a curva e obter, de maneira inversa, os valores de  $m_j$  e  $\sigma_{ci}$  em base aos esforços principais na rocha. A Tabela 2 demonstra as propriedades geomecânicas consideradas para do maciço rochoso.

Domínio	mb	s	a	$\sigma_{cm}$ (MPa)	$\sigma_{tm}$ (MPa)	E (GPa)	V
Estéril (HW)	1,83	0,007	0,5	3,05	0,14	21,9	0,23
Minério	4,17	0,036	0,5	19,95	0,91	50,9	0,20
Estéril (FW)	2,48	0,020	0,5	17,17	1,00	44,1	0,21

Tabela 2. Propriedades geomecânicas do maciço rochoso

### 3.2 Quantificação da instabilidade

Por meio da metodologia de utilização dos dados de escaneamento realizados nas 32 câmaras produzidas, foi possível a criação de um banco de dados contendo o desempenho de cada uma das câmaras. Para isso foi utilizado a metodologia de cálculo do fator ELOS, além do cálculo da diluição. A média da diluição foi de 14% e a média do fator ELOS foi de 2,40 m. Em resumo das 32 câmaras produzidas e examinadas:

- 12 tiveram alguma influência estrutural de câmaras adjacentes;
- 4 tiveram galerias de desenvolvimento realizadas dentro da zona do *hangin-wall* que contribuíram para a diluição;
- 16 eram câmaras do tipo secundária;

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A densidade de diluição (DD) dos modelos numéricos produzidos, a partir das câmaras primárias selecionadas, foram plotadas com o valor ELOS obtido a partir dos dados de escaneamento das câmaras. Em outras palavras, a diluição real foi plotada contra o valor projetado (DD) do resultado dos modelos numéricos (Figura 4).



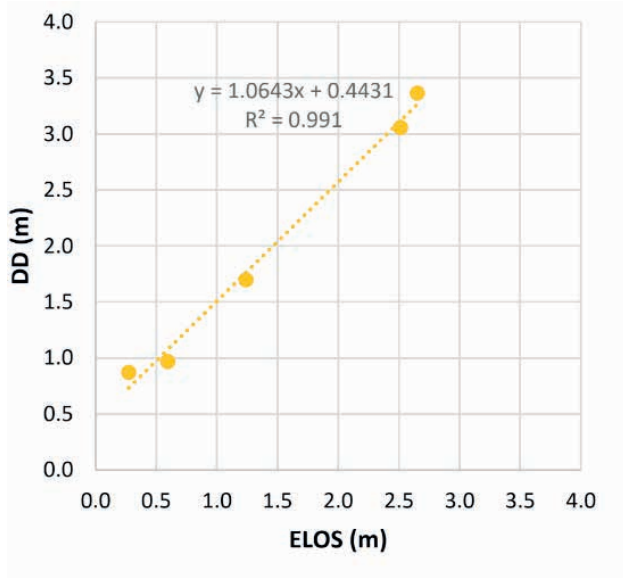


Figura 4. Gráfico dos valores DD plotados com o valor ELOS.

Percebe-se uma boa correlação entre os dados, porém se verifica uma tendência em superestimar a diluição. Também foram realizados modelos numéricos com diferentes valores de  $k_1$  e  $k_2$  de maneira a verificar sua influência no resultado do modelo. A Figura 5 abaixo mostra o gráfico com diferentes valores de  $k_1$  e  $k_2$  testados.

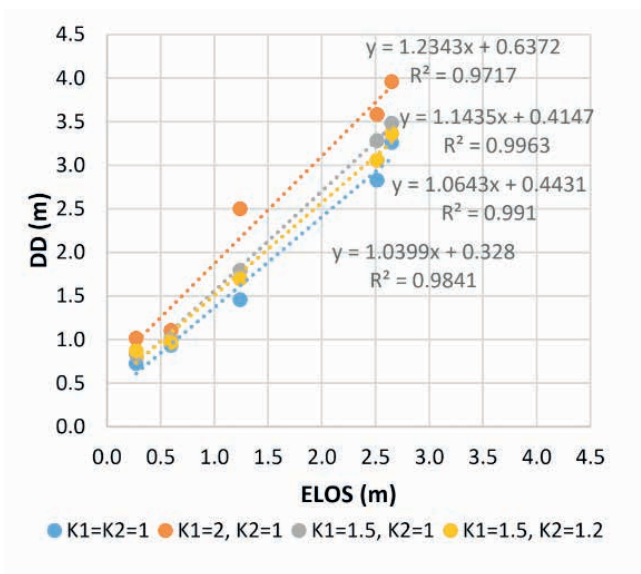


Figura 5. Gráfico dos valores DD plotados com o valor ELOS para diferentes fatores  $k_1$  e  $k_2$ .

Os modelos numéricos para a condição isotrópica de  $k_1$  igual a  $k_2$  e iguais a 1, tiveram melhor ajuste em comparação com os outros valores de  $k_1$  e  $k_2$ . Porém uma condição isotrópica de tensões não reflete a realidade, portanto se manteve a consideração inicial da curva de  $k_1$  igual a 1.5 e  $k_2 = 1.2$  que também possui um bom ajuste entre os dados.

Os outros modelos simulados foram para verificar a influência da sobre escavação da galeria de *undercut* e *overcut*, no relaxamento das tensões do *hangingwall* (Figura 6).

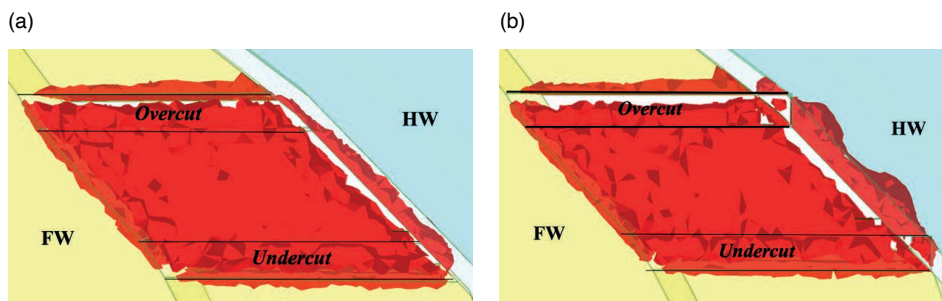


Figura 6. A isosuperfície em vermelho representa a zona de  $\sigma_3 < 0$ , Para um modelo numérico de uma câmara teórica: (a) sem sobre-escavação das galerias no contato com o *hangingwall*; (b) com sobre-escavação das galerias no contato com o *hangingwall*.

A densidade de diluição (DD) calculada para o caso sem sobre escavação é de 1,28m, já para o caso com sobre escavação da galeria no *hangingwall* o valor é 1,64m, ou seja, um aumento em 28% na diluição.

## 5 | CONCLUSÕES

Os dimensionamentos para a escavação de câmaras subterrâneas são geralmente realizados a partir do método empírico de estabilidade. Entretanto esse método não considera a redistribuição de tensões ou zona de relaxamento que ocorre ao redor das escavações quando realizadas. Além disso, os métodos também não consideram o efeito da orientação da escavação com as tensões naturais atuantes.

Por outro lado, o uso de modelagem numérica mostra-se como uma grande ferramenta para análise da instabilidade, e conseqüentemente da diluição. Diferentes desenhos e geometrias podem ser validadas, diminuindo assim a diluição produzida por relaxamento de tensões.

Da mesma forma, o dimensionamento de suporte com tirantes-cabo também pode ser realizado por meio da modelagem numérica, pois a função dos cabos é manter suspenso o volume de material rochoso que está dentro da considerada zona de relaxamento de tensões. O tamanho dos cabos pode ser definido de maneira que estes estejam fora da zona de relaxamento. Já a densidade de cabos pode ser calculada através do peso dessa

zona dividido pela capacidade de carga de cada tirante-cabo.

## REFERÊNCIAS

AMADEI, B.; STEPHANSSON, O. **Rock stress and its measurement**. London: Chapman & Hall, 1997. 490 p.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E.T. **Rock Mechanics for Underground Mining**. 3. ed. New York: Springer Science + Business Media Inc, 2005. 647 p.

CLARK, L.; PAKALNIS, R. An empirical design approach for estimating unplanned dilution from open stope hangingwalls and footwalls. Em: 99th CIM-AGM, Vancouver. **Proceedings...** Calgary: CIM, 1997.

CORDOVA, D. P. **Análise da diluição no método câmaras transversais utilizando modelagem numérica - estudo de caso mina Arenal Deeps**. 2016. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Tecnologia Mineral, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

HOEK, E.; BROWN, E. T. **Underground Excavations in Rock**. Londres: Institution of Mining and Metallurgy, 1980, 527 p.

HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.; CORKUM, B. Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. In: 5th north american rock mechanics symposium and 17th tunneling association of canada conference, Toronto. **Proceedings...** Toronto, 2002. p. 267 - 271.

JING, L.; HUDSON, J.A. Numerical methods in rock mechanics. **International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences**, v. 39, n. 4, p.409-427, jun. 2002.

MARTIN, C. D. et al. Stress path and instability around mine openings. In: ISRM CONGRESS ON ROCK MECHANICS, 9th, Paris. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1999. p. 311 - 315.

PARISEAU, W. G. (Ed.). Finite Element Applications in Mining Engineering. em: HUDSON, John A. **Comprehensive Rock Engineering**. Londres: Pergamon Press, 1993. Vol. 1, Cap. 20. p. 491-522.

QUADROS, Telmo Fernando Perez. **Integração de Dados em ambiente SIG para Mapeamento de Favorabilidade Mineral de Ouro na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai)**. 2000. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre.

WANG, Jucheng. **Influence of stress, undercutting, blasting and time on open stope stability and dilution**. 2004. 279 f. Tese (Doutorado) - Department Of Civil And Geological Engineering, University Of Saskatchewan, Saskatoon.