

# Modelagem Numérica como Ferramenta de Análise e Otimização da Diluição no Hangingwall em um Estudo de Caso com Método de Câmaras Transversais

Diogo Peixoto Cordova  
UFRGS, Porto Alegre/RS, Brasil, [diogocordova@me.com](mailto:diogocordova@me.com)

Fernando Alves Cantini Cardozo  
UFRGS, Porto Alegre/RS, Brasil, [fernando.cantini3@hotmail.com](mailto:fernando.cantini3@hotmail.com)

André Cezar Zingano  
UFRGS, Porto Alegre/RS, Brasil, [andrezin@ufrgs.br](mailto:andrezin@ufrgs.br)

**RESUMO:** O impacto econômico da diluição não planejada na lavra está distribuído no aumento de diversos custos do processo, tais como: carregamento, transporte, britagem e moagem, ocasionando um desperdício na capacidade total de processo. Esse trabalho aborda o problema da diluição no *hangingwall* em uma mina subterrânea com método de câmaras transversais, buscando a diminuição dessa diluição a partir da otimização dos desenhos e geometrias utilizando modelagem numérica. Diversos autores já caracterizaram as causas desta diluição e este artigo busca esclarecer a contribuição da diluição devido ao estado tensional do *hangingwall*. O objetivo principal do trabalho é a criação de modelos numéricos que reproduzam o cenário atual de diluição no *hangingwall*, ou seja, que a diluição estimada comparada com a diluição real, medida pelo escaneamento das câmaras, apresente boa correlação. A calibração dos modelos foi realizada através da variação das tensões *in situ* até que o resultado correspondesse a realidade da diluição existente. A partir destes modelos calibrados, foi possível criar novos modelos teóricos que comparam diferentes desenhos de câmaras. Pequenas mudanças de geometria mostraram-se efetivas na diminuição da diluição no *hangingwall* durante a análise dos modelos numéricos. Essa metodologia também pode ser utilizada em conjunto com os métodos empíricos de dimensionamento de *cablebolts* para definição do comprimento e densidade dos cabos a serem instalados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Diluição, hangingwall, cablebolts, câmaras transversais, modelagem numérica, otimização

## 1 INTRODUÇÃO

Na mineração cada método de lavra possui uma diluição mínima teórica. Dessa forma, manter uma baixa diluição é um fator muito importante para o sucesso econômico de qualquer empreendimento.

Este trabalho tem como meta inicial quantificar, a partir de dados de escaneamento de câmaras, as diluições existentes no método *Transversal Stope*, em uma mina de ouro subterrânea que aplica a recuperação de pilares com uso de enchimento cimentado (CRF).

Após uma classificação qualitativa do banco de dados das câmaras, serão definidos os cenários que justificarão análises utilizando-se de modelos numéricos para recriar o cenário de diluição.

## 2 ESTUDO DE CASO

### 2.1 Localização

A mina está localizada na cidade de Minas de Corrales, no norte do Uruguai, departamento de

Rivera, cerca de 70 km ao sul da fronteira internacional com o Brasil e 450 km ao norte da capital do Uruguai, Montevideu.

## 2.2 Geologia regional

O depósito forma parte do distrito aurífero Minas de Corrales, no setor ocidental da chamada Ilha Cristalina de Rivera. 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 1). Ela é caracterizada por um embasamento de rochas metamórficas, que variam entre fácies xistos verdes até granulito, com intrusões graníticas associadas.

As rochas são principalmente granitos-gnaisses e rochas intermediárias calco-alcalinhas (monzonitos, granodioritos e dioritos); também ocorrem, em menor proporção e na zona central, rochas ultramáficas.

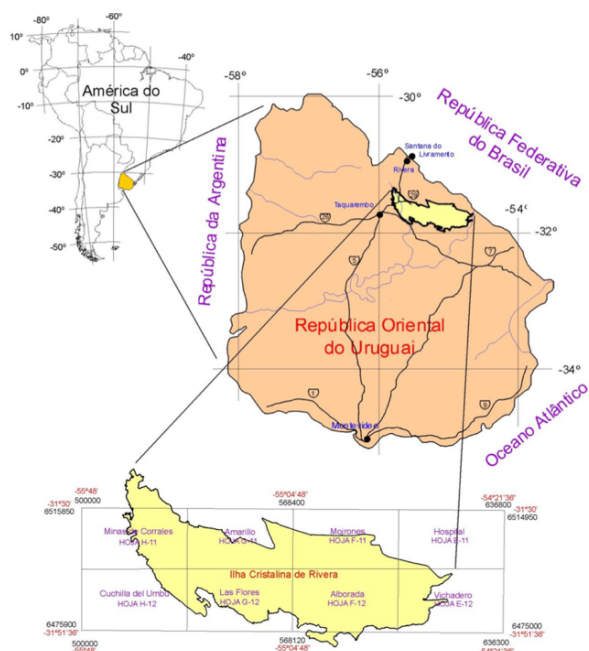


Figura 1. Mapa de localização da Ilha Cristalina de Rivera (Quadros, 2000)

## 2.3 Geologia local

O depósito se desenvolve ao longo de uma zona de cisalhamento de direção principal NW-SE e mergulho variável entre 45 e 70 graus ao sul. O corpo mineralizado, tem uma extensão cerca de 750 m ao longo do rumo (Leste-Oeste) e 750 m ao longo do mergulho.

Processos de alteração hidrotermal intensos, associados a deformação em regime rúptil-dúctil, afetam as rochas monzoníticas

gerando hidrotermalitos altamente deformados.

Esses processos compartimentam o depósito em duas falhas em escala de mina: H1, corresponde ao limite superior da zona hidrotermal (*hangingwall*) e F1, corresponde a base da referida zona (*footwall*); a largura dessa zona varia entre 60-100 m. Uma terceira falha (NW-SE), controla o eixo de imersão da mineralização (~30° ao SE).

## 2.4 Métodos de lavra

Inicialmente, foi realizada a lavra a céu aberto da mina entre 2004 e 2009. Posteriormente foi descoberta a continuidade da mineralização em profundidade, dando origem a mina subterrânea em 2010.

Para a lavra da mina subterrânea foram então definidos dois métodos de lavra, o câmaras e pilares inclinado (IRP – *Inclined Room and Pillar*) e o câmaras transversais (TS – *Transversal Stope*).

### 2.4.1 Câmaras transversais

O método de Câmaras Transversais foi utilizado para extrair a zona mineralizada de maior dimensão, localizada abaixo da cota -120.

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 do *strike* do corpo mineralizado.

Inicialmente entre os níveis -182 e -220 foi utilizado o método de Câmaras transversais, mantendo pilares com cerca de 8m de largura entre as câmaras extraídas, figura 2. Depois de extraídas, as câmaras foram preenchidas com rocha estéril (*Unconsolidated Rock Fill* – URF).

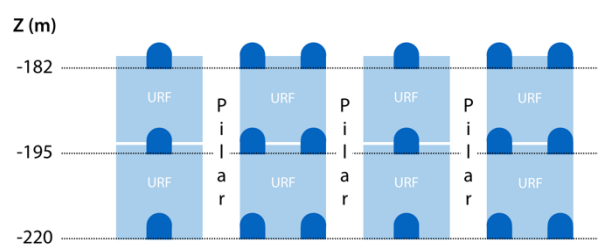


Figura 2. Seção das câmaras extraídas pelo método *Transversal Stope* com pilares adjacentes e já preenchidas com estéril (vista para o norte).

Posteriormente foi aprovado o estudo de viabilidade econômica para mudança do método, onde foi então adotado o método de Câmaras transversais com recuperação dos pilares, utilizando uma mistura de cimento e rocha estéril (*Cemented Rock Fill* – CRF) para as câmaras primárias e enchimento somente com rocha estéril (URF) para as câmaras secundárias. Esse método foi utilizado entre os níveis -120 e -182 com a sequência de lavra mostrada na figura 3.

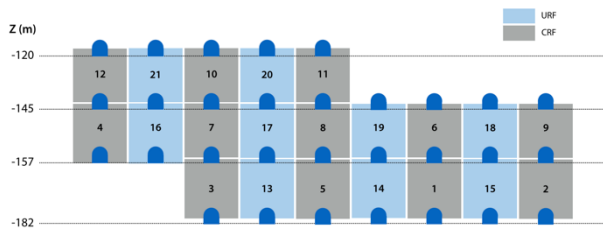


Figura 3. Sequência de extração do método Transversal Stopes sem pilares e com enchimento do tipo CRF e URF (vista para o norte).

As câmaras possuem cerca de 20 m de altura, por 20 m de largura e longitude variável. Essas câmaras se orientam transversalmente através de todo o corpo mineralizado. Neste método, a sequência de extração inicia nas câmaras primárias inferiores em sequência ascendente de lavra, sendo preenchidas com CRF.

Posteriormente é iniciada a extração das câmaras secundárias, assim que as câmaras adjacentes preenchidas com CRF atinjam o tempo de cura necessário.

O ciclo de operações unitárias de uma câmara depende de pelo menos 4 etapas, mostradas na figura 4.

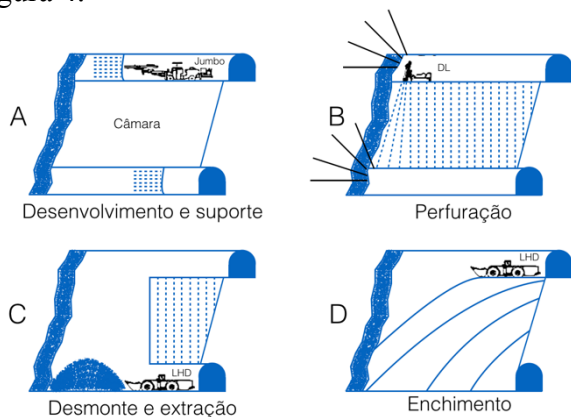


Figura 4. Ciclo de extração das câmaras transversais. A) Desenvolvimento das galerias de acesso e instalação de suporte (*cablebolts*) B) Perfuração, C) Desmonte e extração, D) Enchimento das câmaras com *backfill*.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Tipos de diluição

Existem dois tipos de diluição existentes, a diluição planejada e a diluição não planejada (Scoble e Moss, 1994). A figura 5 a seguir mostra a geometria das diluições existentes em uma câmara.

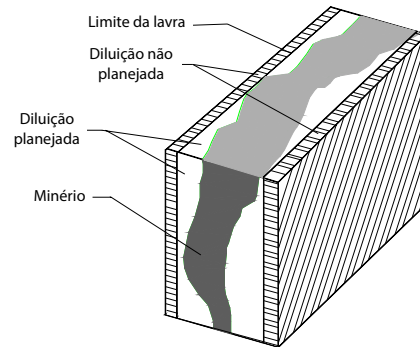


Figura 5. Definição de diluição existente em uma câmara.

##### 3.1.1 Diluição planejada

- Do tipo “interna”: Ocorre devido a presença de inclusões de estéril, presentes na forma de lentes finas, dessa maneira, não podem ser efetivamente separados como estéril durante a lavra. Entretanto, essa diluição já está englobada na estimativa de recursos.
- Pelo tipo de desenho: Quando estéril é extraído de maneira a melhorar a geometria final da câmara.

##### 3.1.2 Diluição não planejada

- Causada pela queda de *backfill* das paredes laterais (câmaras adjacentes), durante a lavra das câmaras secundárias.
- Diluição por *overbreak* ou deslocamento da parede do *hangingwall* ou *footwall*, induzida durante o desmonte das câmaras.

#### 3.2 Quantificação da diluição

Existem vários métodos para cálculo da diluição. Algumas definições importantes sobre diluição são resumidas a seguir segundo (Pakalnis, Poulin e Hadjigeorgiou, 1995):

$$\text{Diluição 1} = \left( \frac{\text{Estéril extraído}}{\text{Minério extraído}} \right) * 100 \quad (1)$$

$$\text{Diluição 2} = \left( \frac{\text{Estéril extraído}}{\text{Minério} + \text{estéril extraído}} \right) * 100 \quad (2)$$

Clark e Pakalnis (1997) utilizaram o volume do *overbreak* e o tamanho da superfície do *stope* como medida de desempenho do *stope*, definindo o ELOS (*Equivalent Linear Overbreak/Slough*):

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

Onde  $V_{OB}^S$  é o volume do *overbreak*, e  $A_S$  é a área da superfície exposta do *hangingwall*.

Uma metodologia desenvolvida por Henning e Mitri (2007) permite avaliar de maneira análoga ao ELOS o potencial de diluição a partir de um modelo numérico tridimensional, onde o volume de diluição é representado pela isolinha de tensão principal menor, igual a zero ( $\sigma_3 = 0$  MPa). Dessa forma o termo densidade de diluição (DD) foi utilizado, sendo sua unidade de medida em metros. Ela é capaz de quantificar o provável deslocamento em qualquer uma das paredes do *stope*. A equação 4 a seguir define a DD.

$$\text{DD} = \frac{\text{Volume de diluição não planejada (m}^3\text{)}}{\text{Área da superfície exposta (m}^2\text{)}} \quad (4)$$

### 3.3 Causas da diluição

Os fatores que induzem a diluição foram resumidos por De La Vergne (2008), como mostra a figura 6 a seguir.

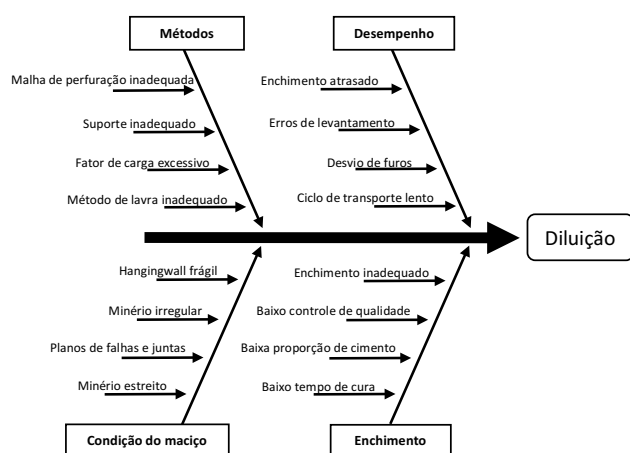


Figura 6. Diagrama de causa e efeito ilustrando os fatores potenciais causadores da diluição. (Adaptado de De la Vergne, 2008).

Este trabalho é focado especificamente na diluição causada por condições do maciço e estado tensional das paredes do *hangingwall* durante a abertura das câmaras.

#### 3.3.1 Influência do estado tensional na diluição

Durante o desenvolvimento das galerias de acesso e dos *drifts* 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 o *undercut* produz 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 7).

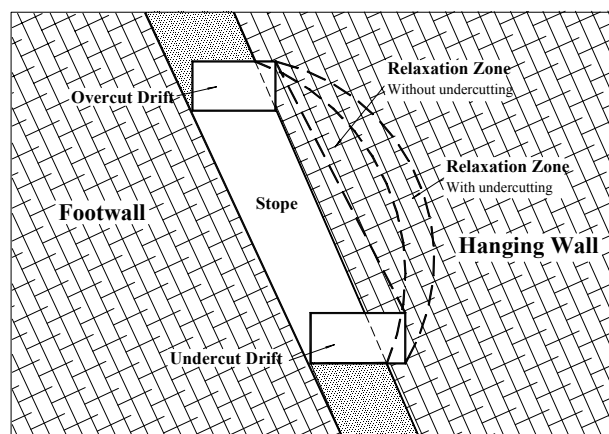


Figura 7. Esquema ilustrativo da influência da zona de relaxamento em uma câmara aberta no método *Sublevel Stope* (Wang, 2004).

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).

Durante a lavra, o *hangingwall* da câmara entra em um estado de baixa tensão ou relaxamento. A extensão dessa zona de relaxamento é influenciada pelo estado tensional antes do início da extração.

Além disso o estado tensional também é influenciado pela geometria das câmaras e

localização delas relativa a outras câmaras adjacentes que já foram mineradas.

Assim, diferentes localizações de câmaras e diferentes sequências de lavra produzem diferentes tensões induzidas nas paredes do *hangingwall*.

## 4 BANCO DE DADOS DE CÂMARAS

### 4.1 Categoria das câmaras

Foram definidas 6 categorias de classificação das câmaras segundo sua localização no momento de sua abertura, como pode ser visto na figura 8 a seguir.

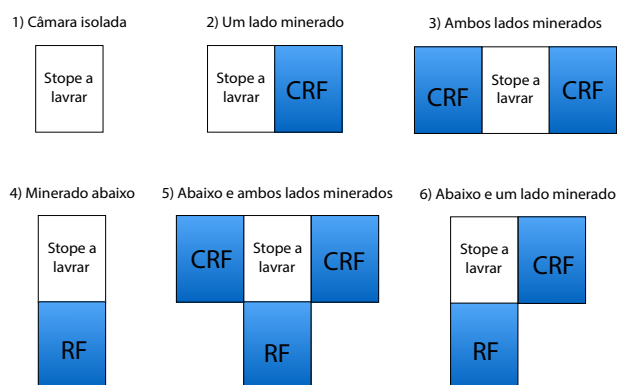


Figura 8. Desenho das câmaras segundo sua classificação em categorias.

A classificação do banco de dados mostrou que as categorias 4 e 5 foram as mais comuns, representado aproximadamente 73% de todos os casos.

### 4.2 Tempo de exposição das câmaras

O tempo de exposição das câmaras é definido como o número de dias entre o primeiro desmonte e o dia do levantamento topográfico com escâner, que geralmente é realizado no final da extração completa do minério desmontado.

Para os *stopes* incluídos no banco de dados desse estudo, o tempo de exposição varia de no mínimo 3 dias para até no máximo 43 dias. Dentre o total, 74% possuem entre 20 e 40 dias de tempo de exposição.

### 4.3 Ângulo do hangingwall

O ângulo de inclinação do *hangingwall* das câmaras analisadas varia de 25° a 90°. O histograma desses ângulos pode ser visto na figura 9 abaixo.

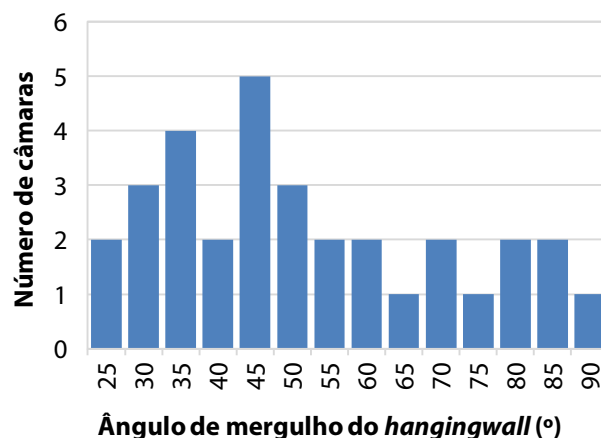


Figura 9. Histograma do ângulo do *hangingwall*.

### 4.4 Classificação ELOS

As câmaras analisadas foram classificadas segundo a classificação ELOS (equação 3) com objetivo de obter valores linearizados da diluição, permitindo uma comparação direta entre diferentes câmaras. A figura 10 abaixo mostra a distribuição dos valores ELOS. A tabela 1 define o intervalo de dano conforme o valor de ELOS definido por Clark and Pakalnis (1997).

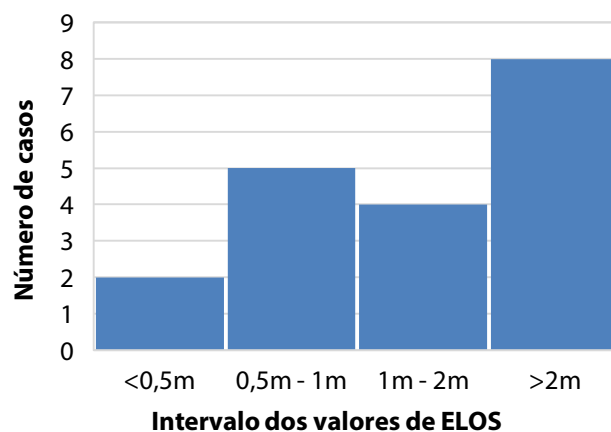


Figura 10. Histograma dos intervalos de valores ELOS

Tabela 1. Intervalos de valores ELOS

| ELOS      | Observação                         |
|-----------|------------------------------------|
| < 0.5m    | Dano causado somente pelo desmonte |
| 0.5m – 1m | Deslocamento leve                  |
| 1m – 2m   | Deslocamento moderado              |
| > 2m      | Deslocamento excessivo             |

## 5 MODELAGEM NUMÉRICA

Os métodos numéricos são apenas ferramentas para a simulação e solução de modelos geomecânicos. Portanto, antes de selecionar o tipo de método numérico que será utilizado é necessário entender o tipo de problema que está sendo enfrentado.

Os maciços rochosos que possuem descontinuidades com baixa persistência e espaçamento médio pequeno, podem ser assumidos como contínuos e homogêneos. O efeito das descontinuidades é inserido na classificação geomecânica que é parâmetro de entrada do modelo numérico.

Foi definida a utilização do método dos elementos finitos (MEF) em três dimensões, onde todo domínio do problema é dividido em pequenas regiões contendo elementos não sobrepostos, que estão conectados uns aos outros através de pontos denominados nós. O software utilizado foi o RS<sup>3</sup> da Rocscience®.

As etapas de criação do modelo numérico são descritas na figura 11.

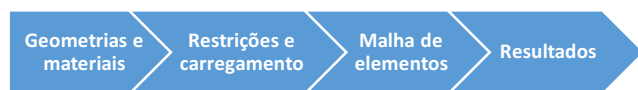


Figura 11. Sequência de criação do modelo numérico.

Após a inserção dos dados geométricos e dos parâmetros de resistência dos materiais, são inseridas as restrições externas do modelo e as tensões principais as quais o modelo está submetido. Por último, se faz necessário discretizar os elementos com uma malha definida de maneira que o software possa computar os resultados do problema.

### 5.1 Parâmetros de entrada

#### 5.1.1 Propriedades do maciço rochoso

As propriedades do maciço foram definidas baseadas na combinação de descrições geomecânicas de sondagens com testemunhos orientados (59 furos, totalizando 7,176 m), ensaios de resistência em laboratório (66 ensaios UCS, 26 ensaios brasileiros de tração, 36 ensaios de compressão triaxial e 24 ensaios de carga pontual), dados na tabela 2 abaixo. O critério de

ruptura adotado foi o de Hoek-Brown generalizado. (Hoek et al, 2002)

Tabela 2. Propriedades geomecânicas do maciço rochoso.

| Domínio  | mb   | s     | a   | $\sigma_{cm}$<br>(MPa) | $\sigma_{tm}$<br>(MPa) | E<br>(GPa) | $\nu$ |
|----------|------|-------|-----|------------------------|------------------------|------------|-------|
| HW       | 1,83 | 0,007 | 0,5 | 3,05                   | 0,14                   | 21,9       | 0,23  |
| Falha HW | 0,12 | 0,001 | 0,5 | 0,35                   | 0,11                   | 3,9        | 0,27  |
| Minério  | 4,17 | 0,036 | 0,5 | 19,95                  | 0,91                   | 50,9       | 0,20  |
| Falha FW | 1,36 | 0,002 | 0,5 | 2,26                   | 0,08                   | 7,7        | 0,26  |
| FW       | 2,48 | 0,020 | 0,5 | 17,17                  | 1,00                   | 44,1       | 0,21  |

#### 5.1.2 Tensões *in situ*

Devido a carência de informações e testes para medida das tensões *in situ* na região, se utilizou o mapa mundial de tensões (Heidbach et al, 2009), sendo considerada a orientação da tensão principal máxima ( $\sigma_1$ ) horizontal em direção norte-sul (tendência 015°) e perpendicular a inclinação do mergulho do depósito. As equações abaixo descrevem as relações entre a tensão vertical, horizontal e as tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ .

$$\sigma_1 = \sigma_h = k_1 * \sigma_v \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \sigma_h = k_2 * \sigma_v \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_3} \quad (8)$$

$$\sigma_3 = \sigma_v = 0.00275 * 9.81 * \text{profundidade} \quad (9)$$

Foram definidos valores de  $k_1$  igual a 1.5 e valores de  $k_2$  de 1.2. A cota média da superfície topográfica é de 125 metros acima do nível do mar. Esses valores de gradiente podem ser considerados conservadores. Entretanto, sem dados de medidas de tensões *in situ*, essa aproximação pode ser considerada válida.

#### 5.2 Calibração do modelo numérico

Após uma análise aprofundada, caso a caso, de cada um dos *stopes* no banco de dados, foram filtrados 5 *stopes* primários que não sofreram diluição causada por fatores externos

conhecidos (erros de desmonte, desvio de furos e outros problemas operacionais). Sendo o valor ELOS de cada um dos *stopes* conhecido, foram criados modelos numéricos que os representassem.

O objetivo é justamente calibrar o modelo, ou seja, verificar se o resultado do modelo numérico (volume da zona de relaxamento modelada e densidade de diluição) se aproximam da realidade de diluição (fator ELOS). Durante a calibração, as tensões *in situ* consideradas serão verificadas.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A densidade de diluição (DD) dos cinco modelos numéricos, produzidos a partir das câmaras primárias previamente selecionadas, foram plotados contra o valor ELOS obtido a partir dos dados de escaneamento das câmaras. Em outras palavras, a diluição real no *hangingwall* foi plotada contra o valor estimado (DD) a partir do resultado dos modelos numéricos (figura 12).

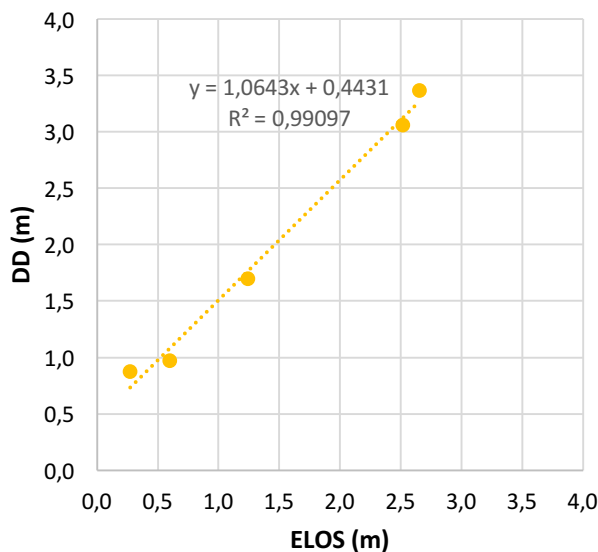


Figura 12. Gráfico dos valores DD plotados com o valor ELOS.

Percebe-se uma boa correlação entre os dados, porém se verifica uma tendência em superestimar a diluição no *hangingwall*. 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 13 abaixo mostra o gráfico com diferentes valores de  $k_1$  e  $k_2$  testados.

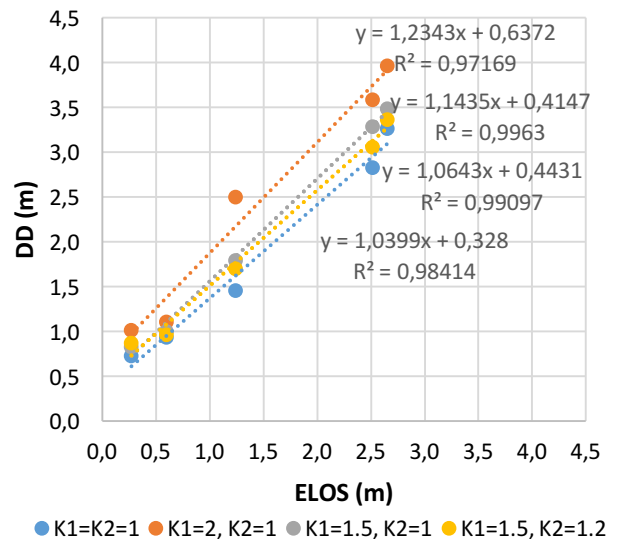


Figura 13. Gráfico dos valores DD plotados com o valor ELOS para diferentes fatores  $k_1$  e  $k_2$ .

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 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* (figuras 14 e 15).

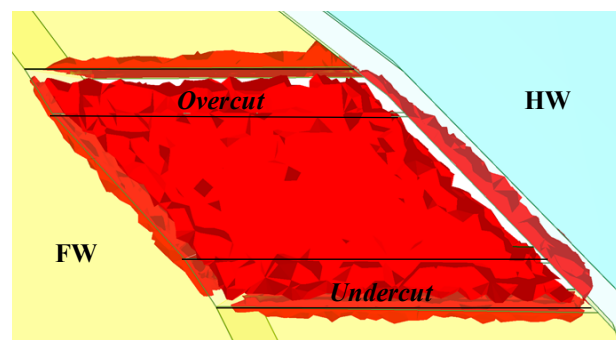


Figura 14. A iso-superfície em vermelho representa a zona de  $\sigma_3 < 0$ , para um modelo numérico de uma câmara teórica sem sobre-escavação das galerias de *undercut* e *overcut* no *hangingwall*.

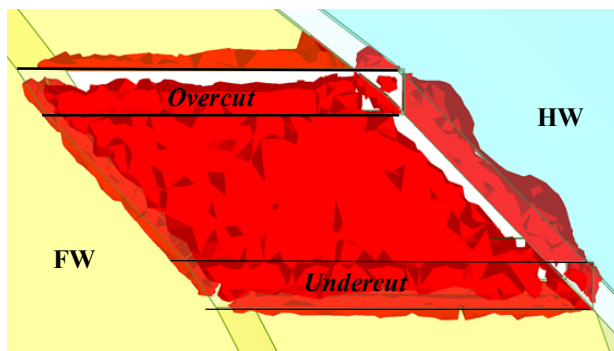


Figura 15. A iso-superfície em vermelho representa a zona de  $\sigma_3 < 0$ , para um modelo numérico de uma câmara teórica com sobre-escavação das galerias de undercut e overcut no hangingwall.

A densidade de diluição (DD) estimada 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, uma tendência de aumento em 28% na diluição quando ocorre sobre escavação da galeria no hangingwall.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os valores estimados de DD, obtidos dos modelos numéricos, quando comparados com os valores reais de ELOS, mostraram boa correlação para o estudo de caso.

As duas geometrias simuladas, para as galerias de undercut e overcut, mostraram a influência da sobre escavação do hangingwall na diluição das câmaras. A geometria da figura 15 produz uma diluição 28% maior em comparação com a geometria da figura 14.

É recomendável utilizar essa mesma análise numérica, em conjunto dos métodos empíricos, no momento do dimensionamento dos cablebolts, pois a função dos cabos é manter suspenso o volume de rocha que está dentro da zona de relaxamento.

O comprimento dos cabos pode ser definido de maneira que este seja maior do que a zona de relaxamento, já a densidade de cabos por  $m^2$  pode ser relacionada através do peso dessa zona de relaxamento dividido pela capacidade de carga de um cabo.

## AGRADECIMENTOS

A UFRGS, aos colegas do laboratório de Mecânica de Rochas e a OMI inc.

## REFERÊNCIAS

- Clark, L. e Pakalnis, R. (1997) An empirical design approach for estimating unplanned dilution from open stope hangingwalls and footwalls. *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum AGM*, Vancouver, Canadá
- De La Vergne, J. (2008). *Hard Rock Miner's Handbook*, Stantec Consulting Ltd, 5º ed, Alberta, Canadá, 330 p
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfes, D. e Müller, B., (2009). The World Stress Map based on the database release 2008, equatorial scale 1:46,000,000, *Commission for the Geological Map of the World*, Paris, França
- Henning, J. G., Mitri, H. S. (2007). "Numerical modelling of ore dilution in blasthole stopping." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(5): pp. 692-703.
- Hoek E, Carranza-Torres CT, Corkum B (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition, *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference*, Toronto, Canada, pp. 267-271.
- Martin, C. D., Kaiser, P.K., McCreath, D.R. (1999). Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*-36, Sudbury, Canadá, p. 136-151.
- Pakalnis, R., Poulin, R., e Hadjigeorgiou, J. (1995). Quantifying the cost of dilution in underground mine. *Mining Engineering*, p. 1136-1141.
- Quadros, T.F.P. (2000) *Integração de Dados em ambiente SIG para Mapeamento de Favorabilidade Mineral de Ouro na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai)*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, UFRGS, 285 p.
- Scoble, M.J. e Moss, A. (1994). Dilution in underground bulk mining: Implications for production management, mineral resource evaluation II, methods and case histories, *Geological Society Publication*, No. 79, p. 95-108.
- Wang, J. (2004). *Influence of stress, undercutting, blasting and time on open stope stability and dilution*, PhD Thesis, Department of Civil and Geological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon Saskatchewan, Canadá, 279 p.