

O USO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS NA DETERMINAÇÃO DE DILUIÇÃO NÃO PLANEJADA EM MÉTODOS DE LAVRA SUBTERRÂNEA OPEN STOPE

Paulo André Charbel

Instituto Federal de Goiás, IFG, Goiânia, Brasil, pauloanch@gmail.com

Hernán Eduardo Martínez Carvajal

Universidade de Brasília, UnB, Brasília, Brasil, carvajal@unb.br

Márcio Muniz de Farias

Universidade de Brasília, UnB, Brasília, Brasil, muniz@unb.br

André Pacheco de Assis

Universidade de Brasília, UnB, Brasília, Brasil, aassis@unb.br

RESUMO: O dimensionamento de realces é uma fase estratégica do planejamento de mina subterrânea, na qual realces são projetados com dimensões, tão grandes quanto possíveis, que sejam compatíveis com níveis aceitáveis de diluição não planejada de minério. O desafio posto aos geomecânicos é quantificar, previamente, na fase de planejamento de mina, a diluição não planejada de minério associada a dimensão de um realce. Usualmente, as minerações ao redor do mundo, utilizam métodos empíricos para dimensionar realces e estimar a diluição não planejada. Os métodos numéricos são também empregados, principalmente, para avaliar como variáveis operacionais podem afetar a diluição não planejada em realces de mina. Em ambos os métodos, a diluição não planejada é tratada, em geral, como variável determinística. Este trabalho propõe quantificar a diluição não planejada, por meio de simulações numéricas, considerando as incertezas associadas à variabilidade natural dos parâmetros geomecânicos e as variações de condições operacionais, o que permite tratar esta diluição como variável aleatória e quantificá-la com maior acurácia. Possivelmente, o tratamento da diluição não planejada como variável aleatória, associado à experiência profissional, pode resultar em maior sucesso nas tomadas de decisões sobre o dimensionamento de realces de mina.

PALAVRA-CHAVE: diluição não planejada, dimensionamento de realce e simulação numérica.

1 INTRODUÇÃO

A diluição de minério representa a contaminação do minério por rocha estéril e se constitui em uma das principais medidas para controlar a qualidade da lavra, em minas subterrâneas. Nos métodos de lavra *open stope* e suas variações, há dois tipos de diluição, planejada e não planejada (Figura 1). A diluição planejada (diluição interna ou diluição primária) refere-se ao material abaixo do teor de corte, que se encontra dentro dos limites do realce projetado ou limites de lavra. Esta diluição é inerente ao método de lavra selecionado. A diluição não planejada (diluição externa ou de diluição secundária) refere-se ao material abaixo do teor de corte, que se encontra além dos limites do realce projetado ou limites

de lavra. Esta diluição decorre de: deslocamentos das paredes do realce, capa e lapa; sobre escavação (*overbreak*); e escavação inesperada de enchimento de realces já lavrados (Scoble & Moss, 1994; Tatman, 2001). Embora ambas sejam importantes, somente a diluição não planejada será abordada neste trabalho.

A diluição não planejada tem implicações significativas na viabilidade econômica de uma mina. Primeiro, aumenta os custos de lavra, pois haverá mais toneladas de rocha estéril a ser carregada, transportada, tratada e descartada como rejeito (Pakalnis *et al.*, 1995). Em segundo, o aumento da diluição de minério reduz a recuperação de minério na planta de beneficiamento, conforme observado por Tatman (2001). Logo, a diluição não planejada

reduz o valor presente líquido (VPL) de cada bloco de minério lavrado, o que reduz o fluxo de caixa de uma empresa de mineração. Por esta razão, as estimativas de diluição não planejada, na fase de planejamento mina, são variáveis importantes para o dimensionamento de realces, uma vez que esta diluição está relacionada às dimensões dos realces, entre outros fatores.

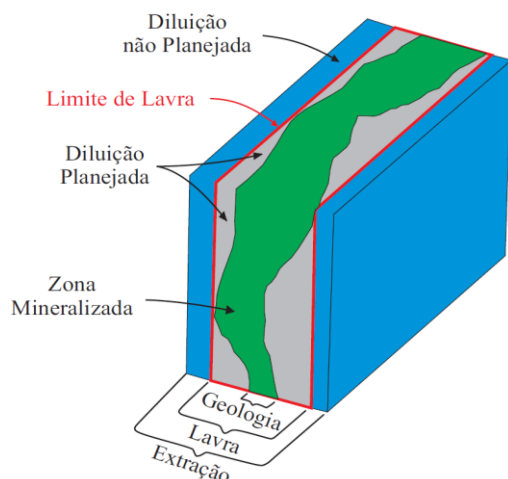


Figura 1 – Diluições planejada e não planejada (modificado de Scoble & Moss, 1994).

O dimensionamento de realces tem como objetivo projetar realces tão grandes quanto possíveis, com o intuito de reduzir os números de realces e, por conseguinte reduzir os custos operacionais de lavra. No entanto, quanto maior as dimensões de um realce, maior é a diluição não planejada. Portanto, o objetivo do dimensionamento de realce é projetar realces tão grandes quanto possíveis, onde níveis aceitáveis de diluição não planejada sejam verificados. Deve-se observar que o nível aceitável de diluição difere de mina para mina, pois depende do teor de minério, do grau de diluição do material, de custos operacionais e de preços dos metais (Pakalnis *et al.*, 1995).

Para dimensionar realces de mina, as minerações, ao redor do mundo, utilizam métodos empíricos e numéricos. Ambos os métodos apresentam vantagens e desvantagens. O desafio é prever, quantitativamente, a diluição não planejada associada a cada dimensão de realce, na fase de planejamento de mina. Esta quantificação prévia permite projetar realces, com dimensões máximas que atendam a níveis aceitáveis de diluição não planejada.

Nos métodos empíricos, o projeto de realces baseia-se em experiências anteriores de minas.

Um dos métodos empíricos, amplamente utilizado, é o método gráfico de estabilidade. Apesar do uso corrente dos métodos empíricos, o emprego de métodos numéricos tem aumentado nas últimas décadas. Diferente dos métodos empíricos, a simulação numérica descreve o comportamento tensão-deformação do maciço rochoso, em torno do realce. A descrição deste comportamento contribui para compreender o fenômeno físico de deslocamentos nas paredes de um realce, capa e lapa, o que permite correlacionar a diluição não planejada com as dimensões do realce, por meio de simulações numéricas.

Face às implicações econômicas da diluição não planejada sobre a viabilidade econômica de uma mina e o desafio em quantificar esta diluição, desenvolveu-se um trabalho acadêmico na mina subterrânea de zinco de Vazante, de propriedade da Votorantim Metais. A mina, em estudo, localiza-se no município de Vazante, Minas Gerais, Brasil. O método de lavra adotado é lavra em recuo vertical (VRM).

O objetivo deste trabalho é demonstrar como a diluição não planejada foi quantificada por meio de simulações numéricas, considerando as incertezas associadas à variabilidade natural dos parâmetros geomecânicos e a variação de condições operacionais de lavra. Para tanto, o trabalho está separado em quatro tópicos: causas da diluição não planejada; cálculo da diluição não planejada; caracterização geomecânica e operacional; simulação numérica.

2 CAUSAS DA DILUIÇÃO NÃO PLANEJADA

A partir dos trabalhos realizados por Pakalnis (1986) e Potvin (1988), surgiram diferentes estudos abordando os fatores que influenciam a diluição não planejada nos métodos lavra *open stope* e suas variações, tais como Scoble & Moss (1994), Clark (1998), Stewart (2005), Cepuritis & Villaescusa (2006), entre outros. Com base nestes trabalhos, os fatores que influenciam a diluição não planejada podem ser separados em dois grupos: condições geomecânicas do maciço rochoso e; condições operacionais de lavra.

O primeiro grupo, condições geomecânicas, engloba fatores intrínsecos e extrínsecos ao

maciço rochoso. Os fatores intrínsecos relacionam-se a parâmetros da rocha intacta e a condições de descontinuidades do maciço. Por sua vez, os fatores extrínsecos relacionam-se ao estado de tensão e a condições de fluxo de água subterrânea. O segundo grupo, condições operacionais de lavra, refere-se a aspectos operacionais do método de lavra *open stope* e suas variações, como por exemplo, as dimensões dos realces, o efeito da detonação sobre as rochas encaixantes na capa e na lapa dos realces, o sequenciamento de lavra, além de outros.

3 CÁLCULO DA DILUIÇÃO NÃO PLANEJADA

Pakalnis (1986) pesquisou o cálculo da diluição não planejada, em 22 minas canadenses, e identificou diferentes formas de cálculo. Dentre estas formas de cálculo, aquelas amplamente utilizadas nas práticas das minas canadenses são as descritas pelas seguintes equações:

$$DnP = \left(\frac{MED}{MM} \right) \quad (1)$$

$$DnP = \left(\frac{MED}{MED+MM} \right) \quad (2)$$

onde, DnP é a diluição não planejada, MED massa de rocha deslocada das encaixantes do realce e MM é a massa de rocha contida dentro dos limites de lavra do realce planejado.

A equação (1) é mais sensível a diluição não planejada, comparada a equação (2). Por esta razão, a equação (1) é recomendada como uma medida padrão de diluição não planejada (Pakalnis *et al.*, 1995). Na mina Vazante, o cálculo baseia-se na equação (2), o que determinou o uso desta equação neste trabalho.

4 CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA E OPERACIONAL

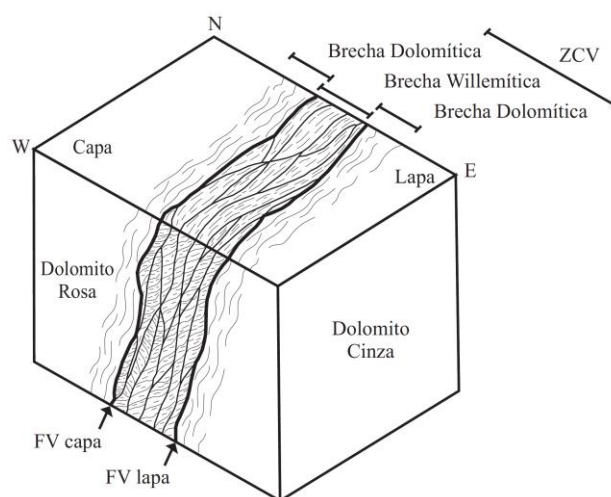
A caracterização da mina consistiu em uma caracterização geomecânica do maciço rochoso e uma caracterização de condições operacionais de lavra. Ambos foram utilizados como dados de entrada para as simulações numéricas. Assim, a caracterização da mina subterrânea de Vazante

está separada em dois tópicos: caracterização geomecânica e caracterização operacional.

4.1 Caracterização Geomecânica

A caracterização geomecânica consiste em descrever as condições intrínsecas e extrínsecas do maciço rochoso. As condições intrínsecas referem-se a parâmetros da rocha intacta e a condições das descontinuidades do minério e de rochas encaixantes. As condições extrínsecas referem-se ao estado inicial tensão no maciço.

A mineralização está localizada em uma zona de cisalhamento que corta uma sequência de rochas carbonáticas (Figura 2). Três litologias foram identificadas: brecha mineralizada, brecha carbonática e rocha carbonática.



LEGENDA

ZCV – Zona de Cisalhamento Vazante FV – Falha Vazante

Figura 2 – Modelo geológico (modificado de IPT, 1994).

Por meio do mapeamento geológico-geotécnico, observaram-se dois aspectos sobre as famílias de descontinuidades, presentes em cada litologia: primeiro, as famílias apresentam-se pouco espaçadas; segundo, entre estas descontinuidades, não se verifica uma família significativamente mais fraca do que as demais.

Portanto, assumindo desvios aceitáveis de uma condição ideal, o maciço foi tratado como um meio isotrópico e contínuo.

Para a brecha mineralizada, a brecha carbonática na lapa e as rochas carbonáticas, os parâmetros geomecânicos foram considerados como parâmetros determinísticos (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros geomecânicos da brecha mineralizada, da brecha carbonática da lapa e da rocha carbonática.

Parâmetros	Litologia		
	BXW	BXD _{Lapa}	DCZ
E _{MR} (GPa)	13	10	30
ν	0,2	0,2	0,2
σ_{ci} (MPa)	108	101	124
m _b	2,829	3,102	2,966
s	0,0020	0,0016	0,0117
a	0,509	0,510	0,503
γ (MN/m ³)	0,035	0,030	0,027

BXW é a brecha mineralizada; BXD_{Lapa} é a brecha dolomítica de lapa; DCZ é a rocha carbonática; E_{MR} é o módulo de deformabilidade do maciço rochoso; ν é o coeficiente de Poisson; σ_{ci} é a resistência à compressão simples da rocha intacta; m_b, s e a são parâmetros de resistência de Hoek-Brown e γ é o peso específico.

Para a brecha carbonática da capa, litologia responsável pela diluição não planejada, o módulo de deformabilidade do maciço rochoso (E_{MR}) e a resistência à compressão simples (σ_{ci}) foram considerados como variáveis aleatórias e independentes, e os demais parâmetros como determinísticos (Tabela 2). O objetivo, em considerar o E_{MR} e σ_{ci} como variáveis aleatórias, é avaliar o efeito da variabilidade natural de parâmetros geomecânicos sobre a diluição não planejada. Estes parâmetros, descritos nas Tabela 1 e 2, foram obtidos a partir de: testes de laboratório, em amostras de rocha intacta de pequena escala; por meio do índice GSI (*Geological Strength Index*) atribuído às diferentes litologias; e por meio do programa RocLab (2007). Cabe ainda citar que as brechas dolomíticas, rochas encaixantes, são rochas de comportamento frágil.

Tabela 2 – Parâmetros geomecânicos da brecha carbonática da capa.

BXD _{Capa}	Parâmetros – Variáveis Aleatórias				
	E _{MR} (GPa)		σ_{ci} (MPa)		
	Média	DP	Média	DP	
	10	2	101	35	
	Parâmetros – Variáveis Determinísticas				
	ν	m _b	s	a	γ (MN/m ³)
	0,2	3,102	0,0016	0,510	0,030

BXD_{Capa} é a brecha dolomítica de capa; DP é desvio padrão.

Por fim, estimou-se o estado de tensão inicial considerando o peso da rocha sobrejacente, tensão vertical (σ_v), como tensão principal maior (σ_1). Os índices k_H e K_h, representando as correlações entre as tensões principais

horizontais e a tensão vertical (σ_v), são iguais a 1 e 0,7, e posicionam-se perpendicular e paralelo à direção do corpo de minério, respectivamente.

4.2 Caracterização Operacional

A caracterização operacional consiste em descrever a posição e geometria dos realces, o sequenciamento de lavra, a taxa de extração, o efeito da detonação (D) e as características do enchimento. Os realces analisados referem-se a quatro painéis de lavra isolados dos demais realces de mina. Estes quatro painéis denominam-se 9140, 9100, 9060 A e 9060 B.

As posições e as geometrias dos realces estão descritas na Figura 3, enquanto o sequenciamento de lavra e a taxa de extração estão descritos na Figura 4.

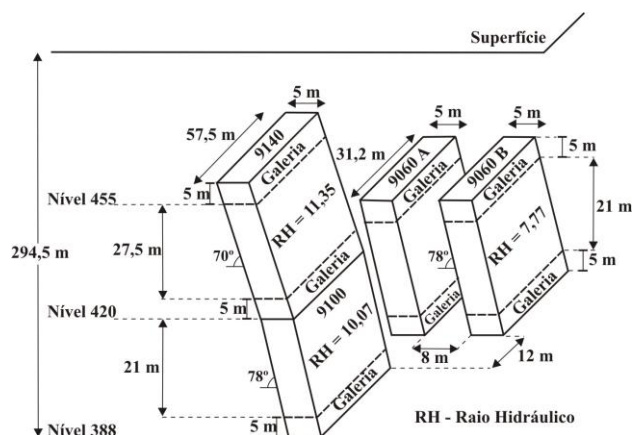


Figura 3 – Posição relativa e geometria dos realces.

O fator D, proposto por Hoek *et al.* (2002) para estimar os danos de detonação sobre os maciços rochosos, tem as suas estimativas e respectivas extensões de zonas afetadas descritas na Figura 5. Com o intuito de avaliar a influência do efeito da detonação sobre a diluição não planejada, o fator D na capa do realce 9140, assumiu valores iguais a: 0,8 para representar o caso real; 0,0 para representar a inexistência de perturbação no maciço; 0,4 para representar uma perturbação intermediária, entre o caso real (D = 0,8) e a hipótese anterior (D = 0,0).

Por último, cita-se que o material de enchimento se compõe de rocha estéril, cujo módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson são assumidos iguais a 300 MPa, e 0,2, respectivamente.

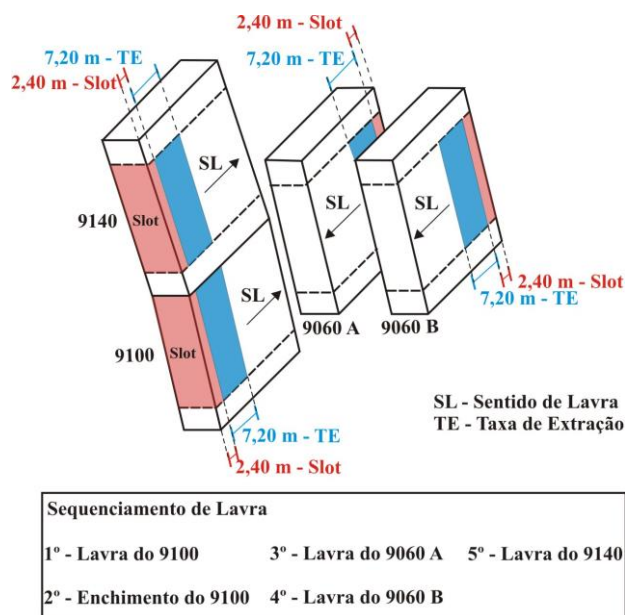


Figura 4 – Sequenciamento de lavra e taxa de extração.

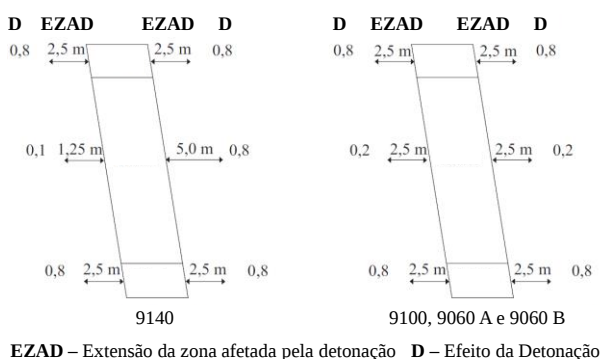


Figura 5 – Fator D e extensão da zona afetada.

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

As simulações numéricas foram utilizadas para descrever a diluição não planejada no realce 9140, considerando a variabilidade natural do E_{MR} e σ_{ci} e as variações do efeito de detonação na capa do referido realce. Estas análises foram realizadas utilizando o programa CESAR-LCPC 3-D, um programa de elementos finitos.

A descrição sobre as simulações numéricas está separada em cinco tópicos: modelo numérico; simulação de lavra; quantificação de diluição não planejada; variabilidade dos parâmetros geomecânicos e das condições operacionais; e resultados das simulações numéricas.

5.1 Modelo Numérico

O modelo numérico, que representa os quatro painéis isolados (9140, 9100, 9060 A e 9060 B), compõe-se de um modelo físico, malha de elementos finitos, modelo constitutivo e estado de tensão inicial, entre outros aspectos.

O modelo físico engloba o modelo geológico (Figura 2), os respectivos parâmetros do maciço (Tabela 1 e 2), a posição relativa e a geometria dos quatro painéis (Figura 3). Já a malha de elementos finitos apresentou 121.125 nós (Figura 6) e os elementos tridimensionais usados foram os elementos hexaédricos e pentaedros com oito e seis nós, respectivamente.

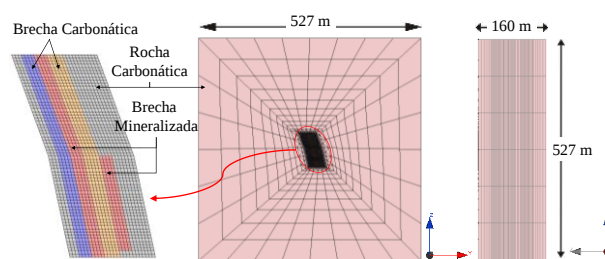


Figura 6 – Malha de elementos finitos.

O modelo constitutivo adotado foi o modelo elástico perfeitamente plástico (EPP), com critério de ruptura de Hoek-Brown, que se aplica a meios isotrópicos e contínuos. Hajiabdolmajid *et al.* (2002) observaram que, em torno de uma escavação subterrânea, onde há baixas tensões confinantes, os modelos EPP não são adequados para prever a extensão e a profundidade de rupturas em rochas de comportamento frágil. Apesar da brecha carbonática comportar-se como uma rocha frágil, o modelo EPP foi utilizado, por não haver outro modelo constitutivo aplicado a rochas, disponível no programa. Por fim, o estado de tensão antes da lavra corresponde ao estado inicial de tensões descrito na caracterização geomecânica.

5.2 Simulação de Lavra

A simulação numérica da lavra reproduziu o sequenciamento de lavra e a taxa de extração, descritos na Figura 4. O efeito de detonação, sobre os parâmetros geomecânicos dos maciços em torno das escavações subterrâneas, foram considerados paulatinamente em cada etapa de

escavação. Como resultado da lavra, zonas com concentração de tensões surgem na capa dos realces e deformações plásticas são verificadas nestas zonas, sempre que as tensões induzidas superam a resistência mecânica do maciço. Análises detalhadas destas regiões tornam-se importantes, pois a diluição não planejada está associada às zonas de deformação plástica.

5.3 Quantificação da Diluição não Planejada

A diluição não planejada ocorre dentro de zonas de deformações plásticas em torno dos realces. Especificamente na mina de Vazante, esta diluição restringe-se à capa dos realces.

Para determinar a diluição não planejada, nas simulações numéricas, tomou-se a retro-análise de desempenho do realce 9140 como referência. A partir desta retro-análise, correlações, entre o comportamento tensão-deformação do maciço rochoso e o comportamento observado, foram obtidas por meio de análises comparativas.

O comportamento tensão-deformação do maciço advém da simulação numérica de lavra, considerando os valores médios da E_{MR} e σ_{ci} para a brecha dolomítica de capa.

O comportamento observado advém do monitoramento real do realce 9140 por um sistema de monitoramento de cavidades (SMC), também denominado escâner a laser.

Por sua vez, a análise comparativa consistiu em avaliar campos de tensões, deformações, deslocamentos e de outros resultados numéricos em torno dos realces, com o intuito de identificar qual destes campos melhor aderência apresentava aos limites da diluição não planejada definidos pelo escâner a laser. A saída numérica, que melhor representou os limites reais da diluição não planejada, tornou-se o indicador de comportamento utilizado para quantificar a diluição em questão.

Neste trabalho, a análise comparativa, entre o comportamento tensão-deformação e o comportamento observado, demonstrou que os deslocamentos horizontais superiores a um centímetro foi o intervalo de saída numérica, que melhor representou o volume da diluição não planejada (Figura 7). Portanto, este valor de deslocamento horizontal foi assumido como indicador de comportamento para a diluição não

planejada, o que significa que, toda a região na capa do realce que apresentar um deslocamento horizontal igual ou superior a um centímetro representa um volume potencial de diluição não planejada.

Este indicador de comportamento foi usado nas análises seguintes, para avaliar a influência das variações das condições operacionais e a variabilidade natural dos parâmetros geomecânicos sobre a diluição não planejada, no realce 9140.

A possibilidade em considerar as deformações plásticas, ou as tensões, como potencial indicador de comportamento tornou-se difícil, possivelmente, porque os modelos EPP, segundo Hajiabdolmajid *et al.* (2002), não são adequados para avaliar a extensão e a profundidade de rupturas em rocha de comportamento frágil, como as brechas dolomíticas presentes na mina.

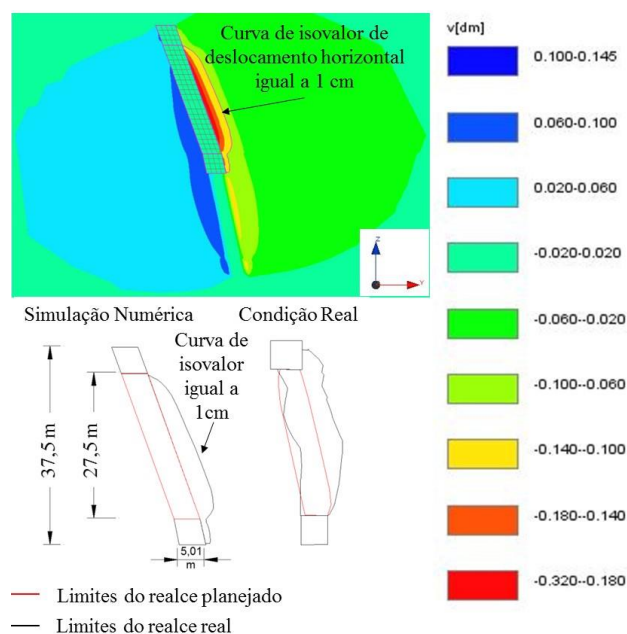


Figura 7 – Indicador de comportamento para diluição não planejada.

5.4 Variabilidade dos Parâmetros Geomecânicos e das Condições Operacionais

As simulações numéricas são análises deterministas. Sendo assim, para considerar a influência das variações de condições operacionais e da variabilidade natural de parâmetros geomecânicos sobre a diluição não planejada, realizaram-se doze análises.

Estas doze análises foram separadas em três grupos. Cada grupo representou um diferente efeito de detonação (D), 0,8, 0,4 e 0,0. Assim, a influência de condições operacionais foi considerada. Por sua vez, com base no método dos pontos de estimativa, um método probabilístico publicado por Rosenblueth (1975, 1981), realizaram-se quatro análises para cada condição operacional (Figura 8), a fim de considerar a influência da variabilidade natural do E_{MR} e σ_{ci} da capa do realce.

Deste modo, a diluição não planejada foi quantificada para cada condição operacional, considerando a variabilidade natural de parâmetros geomecânicos. Consequentemente, foi possível descrever a diluição não planejada como uma variável aleatória, não mais como uma variável determinística.

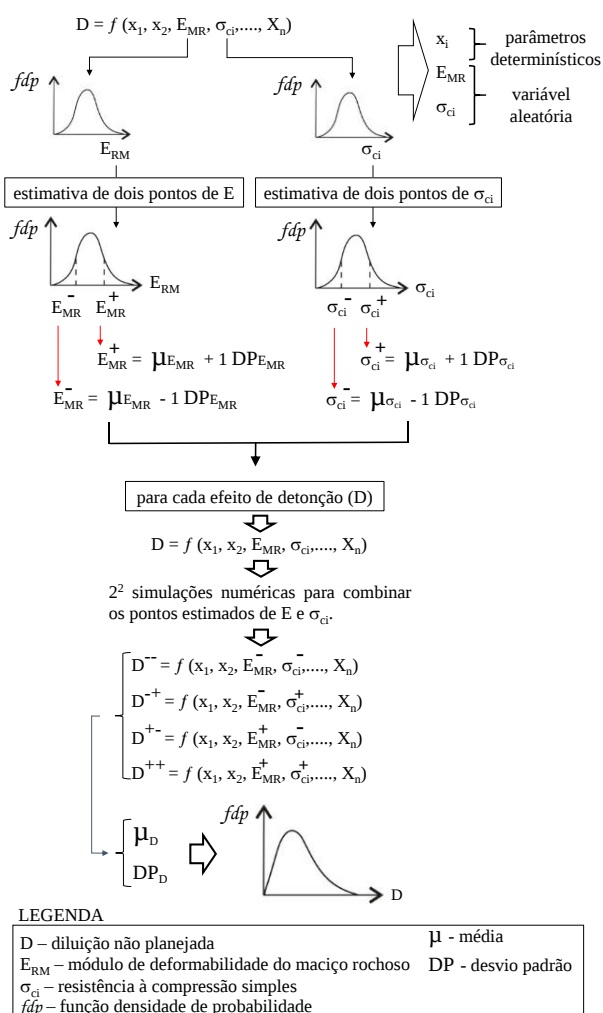


Figura 8 – Variabilidade dos parâmetros geomecânicos e das condições operacionais.

5.5 Resultados das Simulações Numéricas

A diluição não planejada, no realce 9140, foi tratada como uma variável aleatória e, portanto, descrita por uma função densidade de probabilidade (f_{dp}). A curva f_{dp} descreve a probabilidade relativa da diluição em questão assumir um valor particular. Como, esta diluição foi analisada para três condições de efeito de detonação (D), há três curvas f_{dp} , uma para cada condição operacional (Figura 9). A partir das curvas f_{dp} , pode-se avaliar a probabilidade de ocorrência de diferentes valores de diluição não planejada, associados às condições operacionais adotadas e à variabilidade natural de parâmetros geomecânicos.

Com base nesta análise, o planejamento de mina pode definir qual a prática operacional deve ser adotada, a fim de alcançar uma meta de diluição estipulada. Observa-se no momento que, a diluição não planejada descrita foi calculada por meio da equação (2).

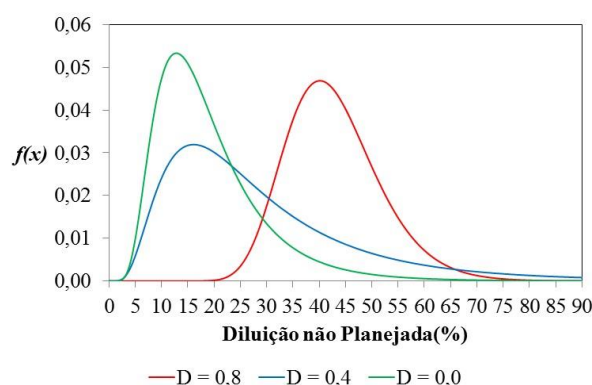


Figura 9 – Curvas f_{dp} de diluição não planejada para cada efeito de detonação.

Esta análise aplica-se a outras variações de condições operacionais e à variabilidade natural de outros parâmetros geomecânicos. No caso de avaliar a influência da variação do comprimento, ou do raio hidráulico, do realce sobre a diluição não planejada, pode-se obter um gráfico semelhante àquele da Figura 9, onde cada curva f_{dp} corresponderia a um comprimento de realce, ou raio hidráulico, analisado. A partir deste gráfico e da experiência profissional, plota-se um gráfico semelhante ao descrito na Figura 10, onde é possível verificar a relação entre o comprimento, ou o raio hidráulico, do realce e os custos operacionais.

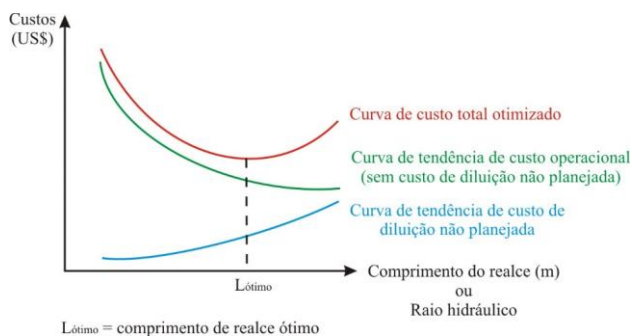


Figura 10 – Curva de custo total otimizado (Charbel, 2015).

A partir da curva de custo total otimizado presente na Figura 10, identifica-se o comprimento, ou o raio hidráulico ótimo. Este comprimento, ou raio hidráulico, de realce ótimo corresponde à dimensão na qual se verificam os menores custos operacionais de lavra.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho acadêmico restringiu-se à análise de quatro realces isolados na mina Vazante, por isso é necessário usar esta abordagem em um número maior de realces de mina, a fim de avaliar a sua aplicabilidade. Apesar disso, três observações podem ser consideradas. Primeira, a simulação numérica é capaz de demonstrar a influência das variações de condições operacionais e da variabilidade de parâmetros geomecânicos sobre a diluição não planejada. Segunda, o tratamento da diluição não planejada como variável aleatória permite estimá-la com maior acurácia, se comparado aos tratamentos determinísticos. Terceira, a curva de custo total otimizado (Figura 10), elaborada com base na descrição da diluição não planejada sob a forma de fdp e na experiência profissional, pode tornar-se uma ferramenta importante para a tomada de decisões no dimensionamento de realces.

REFERÊNCIAS

- Cepuritis, P.M. & Villaescusa, E. (2006). Back analysis techniques for assessing open stope performance. In Australian Mining Technology Conference, Hunter Valley, 26-27 September, 261-271.
- Charbel, P.A. (2015). *Gerenciamento de Risco Aplicada à Diluição de Minério*. Tese de doutorado em geotecnia, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 406.
- Clark, L.M. (1998). *Minimizing Dilution in Open Stope Mining with a Focus on Stope Design and Narrow Vein Longhole Blasting*. MASC thesis, University of British Columbia, Department of Mining and Mineral Processing Engineering, 336.
- Hajiabdolmajid, V.; Kaiser, P.K.; Martin, C.D. (2002). Modelling brittle failure of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 731-741.
- Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. *Proceedings of NARMS-TAC conference*, Toronto, 1, 267-273.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1994). Assessoria em geomecânica na mineração subterrânea de Vazante – Vazante, MG. Relatório Nº 32 032, 58.
- Pakalnis, R.T. (1986). *Empirical Stope Design at the Ruttan Mine, Sherritt Gordon Mines Ltd.* PhD. thesis. University of British Columbia, Department of Mining and Mineral Processing Engineering, 276.
- Pakalnis, R.C.; Poulin R.; Hadjiogeorgiou, J. (1995). Quantifying the cost of dilution in underground mines. *SME Annual Meeting*, Denver, CO, 1136-1141.
- Potvin, Y (1988). *Empirical Open Stope Design in Canada*. PhD. thesis, University of British Columbia, Department of Mining and Mineral Processing Engineering, 350.
- RocLab (2007). Rock mass strength analysis using Hoek-Brown Failure Criterion. [http:// www.rocsience.com](http://www.rocsience.com).
- Rosenblueth, E. (1975). Point estimates for probability moments. *Proc. Nat. Acad. Sci, USA*, Vol. 72, Nº 10, 3812-3814.
- Rosenblueth, E. (1981). Two-points estimates in probabilities. *Appl. Math. Modelling*, vol. 5, 329-335.
- Scoble, M.J. & Moss, A. (1994). Dilution in underground bulk mining: implications for production management. Mineral Resource Evaluation II: Methods and Case Histories. *Geological Society Special Publication*, Nº 79, 95-108.
- Stewart, P.C. (2005). *Minimising Dilution in Narrow-Vein Mines*. PhD. thesis. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, 261.
- Tatman, C.R. (2001). Mining dilution in moderate – to narrow – width deposits. *SME Underground Mining Methods, Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Edited by William Hustrulid and Richard L. Bullock. Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME) Littleton, Colorado, 615-626.