

Comparação do Método Empírico de Lunder e Pakalnis e Modelagem Numérica para Dimensionamento de Pilares na Mina Lamego, Sabará-MG

Gabriel Rezende Freire

AngloGold Ashanti, Sabará, Brasil, GRFreire@AngloGoldAshanti.com.br

David Ribeiro Lima

AngloGold Ashanti, Sabará, Brasil, DRLima@AngloGoldAshanti.com.br

RESUMO: Os métodos empíricos comumente utilizados na mineração são ferramentas importantes para nortear projetos de geotecnia quando as informações sobre o maciço não permitem uma análise mais detalhada. No caso da mina Lamego, foi escolhido o método de Lunder e Pakalnis (Lunder & Pakalnis, 1997) para análise dos pilares de toda a mina, por ser considerado um método mais realista, que leva em consideração o confinamento presente no núcleo do pilar e não simplesmente calcula peso de área tributária sobre o pilar. Com o avanço da coleta de informações na mina Lamego, uma série de trabalhos de calibração de modelos numéricos foram realizados e posteriormente, os pilares da mina começaram a ser avaliados por este método. A inevitável comparação entre ambos mostra que na mina é possível a utilização de um pequeno fator de correção para que possa se fazer com a rapidez do método empírico uma análise assertiva com embasamento técnico nos métodos numéricos calibrados. Porém, apesar da facilidade de se usar uma correlação entre métodos pode deixar para trás pontos importantes que podem ser cruciais na viabilidade de um realce de lavra. O mais importante destes pontos, abordado largamente neste trabalho, é o confinamento do maciço rochoso aumentando a resistência do material como um todo. E o confinamento no caso de *post pillars* em realces de câmaras e pilares, não está relacionado apenas à solicitação do pilar pelo teto e piso, ou pela espessura do material. As paredes no entorno do próprio realce fornecem tensão confinante o suficiente para que os pilares sejam otimizados nessas regiões.

PALAVRAS-CHAVE: Método empírico, modelagem numérica, pilares, Map3D, elementos de fronteira.

1 INTRODUÇÃO

Os métodos empíricos largamente utilizados na indústria da mineração e construção civil são importantes ferramentas para cálculo de estruturas, escavações e projeção de suporte/reforço.

Na mina Lamego de propriedade da AngloGold Ashanti em Sabará-MG, o método de dimensionamento de pilares de Lunder e Pakalnis é constantemente utilizado no dimensionamento dos *post pillars* da mina, e foi até certo ponto a única ferramenta para análise

dessas estruturas.

Com a necessidade de uma análise menos conservadora e mais realista, foram feitos vários modelos numéricos tridimensionais de todos os níveis para estudo de calibração para que haja maior precisão na análise dos pilares.

O trabalho que está demonstrado neste artigo mostra a comparação entre os métodos empíricos e numéricos em um dado local da mina, o cálculo de um coeficiente de ajuste do método empírico, para que este possa ser usado em outros locais da mina adicionando certa melhora no fator de segurança final e assim ser

aplicado uma otimização das estruturas e vãos da mina.

O método de lavra utilizado hoje em Lamego devido à geometria incomum do corpo mineralizado é uma junção entre corte e enchimento e câmaras e pilares ou, em outros realces, método de *open stope* com furação longa deixando também *post pillars*.

A geometria da estrutura mineralizada de Lamego apresenta corpos com espessura de mais de 30 metros, dezenas de metros ao longo do *strike* e baixo ângulo, cerca de 20°. O enchimento dos realces não tem função estrutural, sendo realizado apenas para continuação das operações, com altura apropriada para os equipamentos de saneamento, contenção e perfuração para produção.

2 METODOLOGIA

2.1 Métodos de avaliação

Considerando os métodos de lavra incomuns devido à já citada geometria do corpo de minério da mina Lamego, o cálculo de estabilidade mesmo por métodos empíricos apresenta dificuldades e limitações.

Como mostrado na figura 1, as formas irregulares dos realces, produzem câmaras também irregulares que dificultam a medição dos parâmetros métricos relacionados aos vãos adjacentes aos pilares. Esta figura mostra uma visão em planta do realce do nível 4, corpo carruagem, da mina Lamego. Nela encontram-se o limite das escavações, os pilares do projeto (mesmo os que não foram contornados) e os pilares a serem retirados pela recuperação.

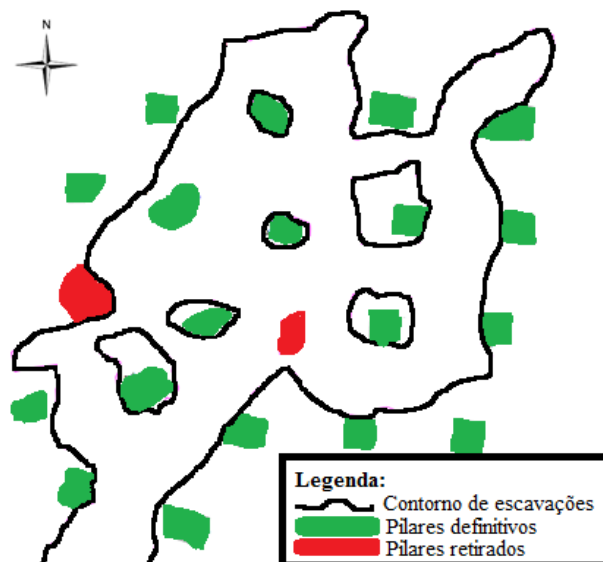


Figura 1. Visão em planta de um realce da mina Lamego.

Outro ponto de atenção no cálculo por este método é o coeficiente de esbeltes do pilar, que no caso de Lamego ficam quase todos abaixo de 0,5.

No estudo dos níveis da mina Lamego, foi procurado um realce com a forma e distribuição de pilares mais regulares, para que a aplicação do método empírico fosse feita da melhor forma e assim permitir a comparação com o método numérico.

Desta forma, para fazer a comparação dos métodos e assim chegar ao coeficiente de “ajuste”, foi escolhido o conjunto de pilares do nível 5.1 do corpo carruagem. (Figura 2)

2.2 Map3D

Embora o xisto (rocha encaixante) possa ser considerado uma rocha com comportamento elasto-plástico, a modelagem tridimensional para as condições de lavra propostas, considerou a simulação estritamente elástica como representativa da realidade, devido à restrições do método de cálculo, *Boundary Element Method* (BEM), ou método dos elementos de contorno.

Outra opção de cálculo seria o uso de modelagem com o método dos elementos finitos que é usado em construções menos complexas, modelos de detalhe e em regiões menores, sendo todo o resultado mostrado e calculado em elementos delimitados por uma

área (2D) ou volume (3D) que englobam toda a região do modelo. Porém, há limitações quanto à extensão do modelo em um dos eixos (no caso dos *softwares* bidimensionais) e velocidade de processamento devido à quantidade de variáveis envolvidas no cálculo, forçando a ter geometrias simples para que o cálculo seja viável. Neste caso, é necessário o uso do método que aceite a maior complexidade geométrica e de parâmetros (Zienkiewicz, 1977).

Os resultados no BEM podem, porém, induzir a recomendações otimistas, sendo que tais devem ser complementadas com conhecimentos especializados de campo (Brady & Bray, 1978). A presença de descontinuidades, planos de falha e estruturas geológicas singulares ou mesmo percolação de água não foram consideradas no modelo e podem ter impactos significativos na estabilidade do maciço (Austin et al, 1982). No entanto, as descontinuidades com distribuição sistemática no maciço são consideradas no método de ruptura de Hoek-Brown, penalizando o maciço através dos parâmetros *mb* e *s* (Barton, 1995).

O *software* Map3D, de elementos de contorno (BEM), simula domínios de rocha com comportamento puramente elástico e não possibilita a inclusão de esforços de elementos de contenção como cabos, tirantes, *swellex*, etc. (Wiles, 2004). De modo que, as unidades de contenção que serão aplicadas no local foram desconsideradas nos modelos tridimensionais. Entretanto, para efeito de análise de estabilidade de pilares, cuja estabilidade geral não depende diretamente dos elementos de suporte, os efeitos de tais elementos podem ser omitidos sem perda considerável no resultado das análises numéricas, tornando os resultados das análises mais conservadores.

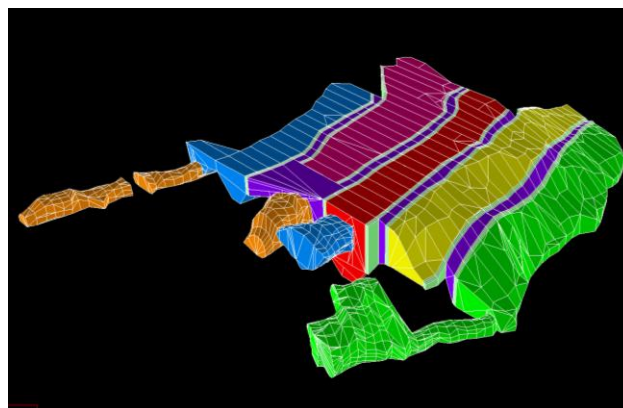


Figura 2. Vista em perspectiva do modelo 3D do realce 5.1, corpo Carruagem.

2.3 Parâmetros das rochas e tensão *in situ*

As propriedades mecânicas do material rochoso assumidas para a modelagem numérica são mostradas na tabela 1. Os parâmetros utilizados nos modelos são uma média entre os resultados obtidos de ensaios geotécnicos em laboratório com amostras da mina Lamego em abril de 2014 e dados anteriores (2004), mais conservadores. Os valores médios foram obtidos através de vários estudos de calibração realizados na mina. Para a análise dos parâmetros do maciço rochoso *mb* e *s* (Hoek & Brown, 1988), foram considerados também os dados de mapeamento geológico-geotécnicos de campo.

Tabela 1. Propriedades do maciço rochoso.

Parâmetro	Unidade	Encaixante Xisto	Minério BIF / MCH
UCS	MPa	67	251
GSI	MPa	20,0	80
Módulo de Young	Gpa	22,2	52,45
Poisson	-	0,25	0,185
<i>mb</i>	graus	2,406	9,791
<i>s</i>	MPa	0,007	0,108

Para fins de modelagem numérica, foi assumida a utilização de dados de tensão *in situ* medidos na mina Cuiabá, devido à semelhança geológica, geotectônica e à proximidade. O modelo adotado para o campo de tensões foi baseado na tensão vertical devido ao peso da coluna de rocha. Deste modo, estabelece-se que o valor da tensão vertical aumenta linearmente com a profundidade, segundo a expressão $\sigma_v =$

p.g.h, sendo a densidade da rocha equivalente (ρ) a 2700 kg/m³. A tensão horizontal foi considerada 1,5 vezes o valor da tensão vertical, ou $k=1,5$. Todos estes dados estão resumidos na tabela 2.

Tabela 2. Propriedades do maciço rochoso.

Parâmetro	Valor
Cota de referência	1000
σ_1 na referência (MPa)	0
σ_2 na referência (MPa)	0
σ_3 na referência (MPa)	0
Variação de σ_1 (MPa/m)	-0,0405
Variação de σ_2 (MPa/m)	-0,027
Variação de σ_3 (MPa/m)	-0,027
σ_1 trend	297
σ_1 plunge (°)	5

2.4 Modelagem

Com os parâmetros calibrados em vários pontos da mina com instrumentação, desarticulações, etc., foi solicitado ao *software* um *plot* de resultados da análise em um plano no interior de cada pilar.

Os pontos no centro dos pilares foram tomados como representativos da estabilidade de cada um deles (Figura 3).

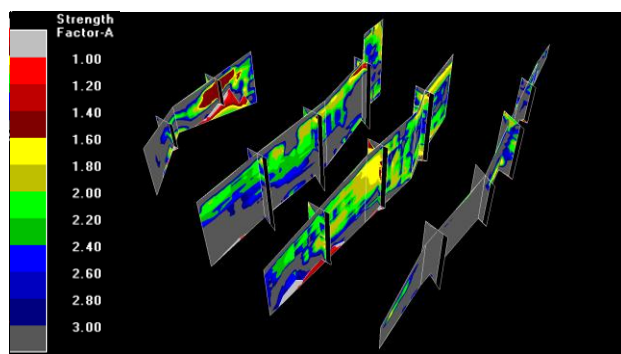


Figura 3. Vista dos planos de resultado no corpo carruagem, realce 5.1, com maior detalhamento em cada pilar.

Como os pilares avaliados foram considerados como compostos por BIF (Formação Ferífera Bandada), rocha com comportamento frágil e representados pelo critério de ruptura de Hoek-Brown com comportamento puramente elástico, os resultados de estabilidade podem ser

avaliados com o *Strength Factor* (SF-A), que calcula a quebra do maciço considerando os parâmetros de resistência do mesmo, tensão induzida e tensão confinante. Este método assume que o caminho do maciço até a quebra ocorre através do aumento da tensão principal com influência direta do confinamento atuante. Segundo o método de ruptura de Hoek-Brown, o *Strength Factor* é determinado pelo gráfico da figura 4.

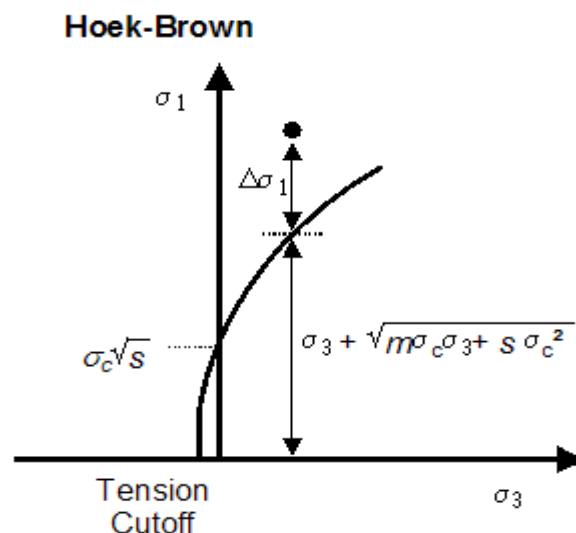


Figura 4. Gráfico explicativo do método de cálculo do SF-A no *software* Map3D.

O cálculo do SF-A é realizado considerando a tensão confinante, resistência à compressão uniaxial e parâmetros de Hoek (todos na equação da figura 4), comparando ao ponto da curva correspondente à aquela tensão confinante. Assim, é feito o cálculo do fator, maior ou menor que 1, dependendo da variação da tensão principal, abaixo ou acima da curva.

É importante ressaltar que o SF-A não corresponde ao fator de segurança. Ele representa a probabilidade de quebra da rocha e não o colapso do maciço rochoso no local. Desta forma será avaliada a preservação do núcleo dos pilares, considerando $SF-A > 1$ como estável nos resultados.

Com o cálculo do fator de segurança pelo método de Lunder e Pakalnis e o *Strength Factor*, chegou-se ao gráfico da figura 5:

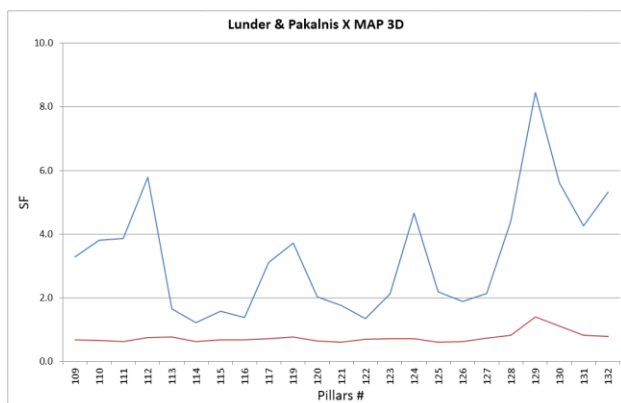


Figura 5. Gráfico com a comparação de resultados entre os métodos nos pilares do nível 5.1.

A linha vermelha do gráfico representa os valores do fator de segurança calculados pelo método empírico. O fato de haver resultados tão parecidos é esperado, já que as dimensões dos pilares, câmaras e estado de tensões a que os pilares estão submetidos são similares.

Já no SF-A retirado do *software*, a diferença é explicada por um importante fator não considerado no método empírico: a influência do confinamento das paredes do realce no pilar. Sem que haja uma análise mais profunda entre as vantagens e desvantagens de cada método, este já é um fator que traz um ganho expressivo no uso da modelagem numérica tridimensional.

Porém, para efeito de comparação e para que não haja um aumento mascarado no fator de correção, os números vindos dos pilares que não estão localizados no centro do realce, com efeito das paredes, não foram considerados.

Sendo assim, a soma dos valores de SF-A dos pilares indicados no gráfico dividido pelos valores de fator de segurança dos mesmos pilares, tem como resultado 1,16.

Com o coeficiente de correção calculado, foi extrapolado para o restante da mina, onde viabilizou-se uma revisão (redução) e/ou recuperação de alguns pilares nos níveis superiores.

3 CONCLUSÕES

Se não considerado o efeito das paredes limítrofes do realce nos cálculos, o método empírico de Lunder e Pakalnis para análise de estabilidade dos pilares atinge uma notória

proximidade com a modelagem numérica calibrada.

O fato de não haver um simples cálculo de peso da área tributária sobre uma estrutura e sim uma expressão complexa que considera entre outros, o confinamento do núcleo do pilar, explica esta visão mais otimista deste método.

No caso dos pilares da mina Lamego, há um campo de estudos de grande importância com a consideração do confinamento induzido pelas paredes. Claramente, o uso de modelagem tridimensional pode auxiliar na otimização máxima dos vãos e pilares nos realces onde o método híbrido descrito neste trabalho foi utilizado devido à influência das paredes do realce. Assim como no método de Lunder & Pakalnis, o confinamento se mostra como questão de fundamental importância nos estudos de mecânica das rochas em ambiente subterrâneo, aumentando a resistência da rocha largamente.

Com a multiplicação do fator “1,16” no fator de segurança de todos os pilares da mina, foi viabilizada a recuperação de 20.000 toneladas em massa de minério e 2.000 onças de ouro no ano de 2014, apenas com 16% de aumento do FS.

Sendo assim, este estudo trouxe para a AngloGold Ashanti 2.2 milhões de dólares em receita bruta.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos profissionais da AngloGold Ashanti, especialmente das Gerências Lamego e Mecânica das Rochas, pelo apoio na realização do trabalho. Agradeço também ao Professor Rimas Pakalnis pelas discussões e opiniões ao trabalho quando ainda estava sendo realizado.

REFERÊNCIAS

- Austin, M. W., Bray, J. W. and Crawford, A. M., 1982. A comparison of two indirect boundary element formulations incorporating planes of weakness. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 19(6): 339–44
- Barton, N., 1995. The influence of joint properties in

- modelling jointed rock masses. Proc. 8th Congr., Int. Soc. Rock Mechanics, Tokyo (ed. Fuji), 3: 1023-32. A. A. Bakelma: Rotterdam.
- Brady, B. H. G. and Bray, J. W., 1978. The boundary element method for elastic analysis of tabular orebody extraction, assuming complete plane strain. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 15(1): 29–
- Hoek, E. and Brown, E. T., 1988. The Hoek-Brown criterion – a 1988 update. Proc. 15th Can. Rock Mechanics, Symposium, Toronto, 31-38. University of Toronto.
- Hoek, E. and Brown, E. T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mechanics Min. Sci., 34 (8): 1165-86.
- Lunder, P. J. and Pakalnis, R. C., 1997. Determination of the strength of hard-rock mine pillars. Bull. Can. Inst. Min. Metall., 90 (1013): 51-55.
- Wiles, Terry, 2004. User's manual by Mine Modelling Pty Ltd. Australia.
- Zienkiewicz, O. C., 1977. The finite element method, 3rd edn. McGraw-Hill: London.