

Análise dos Métodos Top Down e Bottom Up e seus Efeitos no Aprofundamento da Mina Cuiabá, Sabará-MG

Gabriel Rezende Freire

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

Rodrigo Peluci de Figueiredo

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, rpfigueiredo@yahoo.com.br

RESUMO: A mina Cuiabá, de propriedade da AngloGold Ashanti tem hoje o método de *sublevel stope* como o principal método de lavra para retirada do minério de ouro. Dentre as várias variações que o método prevê, é adotado o sequenciamento em *bottom up*, ou seja, a lavra é realizada de baixo para cima. Esta sequência prevê em seu ciclo operacional o enchimento dos *stopes* lavrados, para que seja possível a continuação das operações nos *stopes* superiores. Apesar dos motivos operacionais, é na estabilidade das paredes que existe o maior ganho. O pouco que o enchimento de baixa resistência sustenta as paredes, alivia a tensão nos pilares devido à grande área de atuação da força e à menor propagação da quebra no interior do *hanging wall* (HW). Porém o sequenciamento em *top down*, feito de cima pra baixo, pode gerar um aumento substancial na produção da mina no curto prazo. A necessidade de quantificar as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos fez com que a realização desse estudo se tornasse fundamental para as definições da lavra na mina Cuiabá devido às implicações de estabilidade, recuperação e produção que o uso do método errado pode trazer ao futuro deste ativo de nível mundial.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem numérica, *top down*, *bottom up*, *sublevel stope*, método dos elementos finitos.

1 INTRODUÇÃO

A mina Cuiabá, de propriedade da AngloGold Ashanti, no município de Sabará, tinha o corte e enchimento como o principal método de lavra até o final da década de 2000. Para cumprir a produção nos corpos de minério em profundidade, nos últimos anos foi adotado o método de *sublevel stope* como principal meio de extração, principalmente nos corpos mais ricos e potentes: Serrotinho e Fonte Grande Sul. Atualmente tal método é responsável por até 60% da produção da mina em massa (tonelagem).

Dentre as derivações do método, a extração na mina Cuiabá é feita a partir do desenvolvimento de todo o nível iniciando o processo dos subníveis mais profundos. Desta

forma, chamada de *bottom up* (de baixo pra cima em tradução livre), à medida que é lavrado, existe a necessidade de enchimento de todo o vazio para que seja possível a operação da porção acima. O enchimento, além de proporcionar a elevação do piso para a operação, confina o *hanging wall* e barra a propagação da quebra para o interior do maciço. Com a porção plastificada reduzida, a zona de influência também permanece menor, não afetando outras escavações e o maciço adjacente.

Outra forma de extração com *sublevel stope*, é feita desenvolvendo as partes superiores e a lavra se inicia nestas áreas do nível. Este modo, chamado de *top down* (de cima pra baixo em tradução livre), aumenta a produção principalmente quando o desenvolvimento da

rampa não está à frente dos níveis de lavra. Porém, o aumento de produção em curto prazo, pode trazer problemas a médio e longo prazo devido à falta do enchimento hidráulico ou operacional. Com a lavra descendente dentro do nível, todo o carregamento de minério é realizado com equipamentos operados por controle remoto, o que viabiliza a operação no nível já lavrado nas porções superiores.

Esta diferença no confinamento do *hanging wall* é claramente responsável por uma série de problemas de instabilidades por excesso ou sombra de tensão nas escavações adjacentes, porém havia a necessidade que esta diferença de cenários fosse mais bem estudada para quantificar as perdas e ganhos de cada método tanto no curto prazo quanto no futuro da mina. Assim, usando *softwares* que usam o método dos elementos de contorno e o método dos elementos finitos, realizou-se o estudo foco deste trabalho para medir o nível de quebra no *hanging wall* dos corpos de minério, em diferentes profundidades da mina Cuiabá para atestar a relação do aumento da profundidade da mina e a diferença de plastificação e estado de tensões no maciço da mina.

O estudo mostra claramente que a falta do enchimento hidráulico traz já a partir dos primeiros níveis uma diferença entre os métodos *top down* e *bottom up*. Na mina Cuiabá esta diferença inviabiliza o primeiro método já a partir de médias profundidades (500-600 metros), baseado nas propriedades mecânicas do xisto encaixante.

2 MÉTODOS DE LAVRA

2.1 *Bottom up*

O método de *bottom up* é hoje utilizado em todas as frentes de lavra de sublevel da mina Cuiabá. Este consiste em iniciar a lavra de um determinado nível após o desenvolvimento deste nível estar completo, para que toda a lavra seja feita de baixo para cima. Com a função operacional e estrutural, o enchimento é realizado a cada necessidade de alteamento do teto. Como os vazios deixados pelo método de *sublevel stope* possui angulação média a alta,

para que o material desmontado seja forçado a escorrer, este ângulo permite que o material de enchimento encoste nas paredes do vazio mesmo que este material seja composto apenas por material estéril da mina (*rockfill*). No caso da adição do enchimento hidráulico (*backfill*), esta aderência na parede passa exercer o papel confinante antes mesmo do início da deformação do maciço, devido à distribuição da força peso e efeito arco no *backfill* (Pereira, 2011).

O fato de existir um material confinante nas paredes do realce faz com que este absorva uma parte da carga que iria para os pilares. Além disso, o método libera grandes locais para disposição de material estéril proveniente da própria mina.

Porém, o método de *sub level stope* lavrado em *bottom up* somente torna-se viável quando o desenvolvimento das rampas e travessas de acesso está à frente dos níveis que estão para entrar em produção, sendo assim menos produtivo no curto prazo.

2.2 *Top down*

O método de *top down* consiste em iniciar a lavra de um determinado nível da parte superior deste, avançando fogo a fogo até a parte inferior. Com esse sequenciamento, fica impossível o uso de estéril para preenchimento do vazio. Sendo assim, o método perde tanto na disponibilidade de locais para disposição de estéril da mina quanto na sustentação das paredes, principalmente do *hanging wall*. Com a falta de confinamento do *hanging wall*, há um aumento expressivo da tensão resultante nos pilares. Porém, o sequenciamento permite a lavra com desenvolvimento atrasado, o que pode aumentar a produtividade no curto prazo.

3 MÉTODOS NUMÉRICOS

2.1 Definição do método de análise

Mesmo em formas simples de escavações em cálculos bidimensionais, como túneis circulares ou elípticos, são obtidas expressões complicadas para o cálculo analítico de tensões

e deslocamentos. Porém, a grande maioria dos projetos para aberturas subterrâneas envolvem geometrias complexas e influência entre escavações. Uma forma de obter soluções aceitáveis sobre a distribuição de tensões no entorno de escavações com formas irregulares é fazendo a aproximação com formas simples e assim proceder com os cálculos (Brady & Brown, 1985).

Porém, é com o uso de ferramentas computacionais que os cálculos mais complexos se tornam possíveis e viáveis, introduzindo as formas geométricas mais próximas da realidade, anisotropia do maciço rochoso, propriedades diversas das rochas, comportamentos não lineares de materiais, plastificação, efeito tridimensional, tensões *in situ*, etc.

Os métodos computacionais podem ser classificados em dois grupos: métodos diferenciais e métodos integrais.

Nos métodos diferenciais o domínio do problema é dividido em um conjunto de elementos, sendo a solução baseada em aproximações numéricas de equações como as diferenciais de equilíbrio, relações de deformação e deslocamento ou equações de tensão – deformação (Brady & Brown, 1985). Nos métodos integrais de análise de tensões, o problema é solucionado em termos da superfície (ou contorno) dos elementos. Assim, desde que o contorno das escavações ou estruturas é definido e discretizado, o método provê uma redução de ordem dimensional do problema, trazendo maior eficiência computacional do que o comparado com os métodos diferenciais (Crouch & Starfield, 1983).

No ambiente da pesquisa, ambos os métodos serão estudados através de *softwares* que usam tais bases de cálculos na modelagem numérica. Para que possa ser feita a comparação do comportamento do *hanging wall* e realces nos diferentes sequenciamentos, o método numérico deve considerar o enchimento, o efeito da plastificação do *hanging wall* e as propriedades residuais de cada material.

Dentre os métodos convergentes e divergentes disponíveis hoje comercialmente e usados pela mina Cuiabá, há os métodos de elementos de contorno, ou *boundary element method* (BEM) e o método dos elementos

finitos, ou *finite element method* (FEM), cada um com suas vantagens e deficiências provenientes da concepção de cada um deles.

O método dos elementos de contorno é fundamental na construção de grandes modelos, onde são englobadas geometrias complexas das escavações, pilares e da geologia encaixante. Permitem uma boa velocidade de processamento nos modelos tridimensionais e calculam seus resultados no contorno dos elementos construídos, extrapolando estes resultados para o exterior, nos pontos ou planos indicados pelo usuário. Devido a essa forma de se chegar aos resultados no contorno dos elementos e fora dele, torna-se difícil inserir suporte, reforço e fazer cálculos considerando materiais com comportamentos elasto-plásticos. Já o método dos elementos finitos é usado em construções menos complexas, modelos de detalhe e em regiões menores. Todo o resultado mostrado é calculado em elementos delimitados por uma área (2D) ou volume (3D) que englobam toda a região do modelo. Sendo assim, este tipo de modelo permite que sejam considerados suporte, reforço e que sejam realizadas análises elasto-plásticas que considerem o parâmetro residual dos materiais passo a passo durante todo o sequenciamento simulado. 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.

Para que seja realizada a análise tridimensional dos pilares (*rib* e *sill*) e *hanging wall*, foi utilizada uma ferramenta computacional que usa o método dos elementos finitos, apesar de ter sido feita uma simplificação da geometria dos painéis lavrados e a consideração de apenas 3 níveis de lavra, sendo os resultados colhidos no nível central.

4 METODOLOGIA

Para simplificar o modelo, foram assumidos alguns conceitos importantes, que fizeram com que os resultados fossem obtidos de maneira mais rápida e clara.

Mesmo com a importância da utilização de materiais com propriedades elasto-plásticas, alguns pontos do modelo podem ser considerados como materiais puramente elásticos sem perdas no rigor dos resultados. Como exemplo, o fato de se considerar o material mineralizado, incluindo pilares e áreas ainda não lavradas, *foot wall* e *backfill* como materiais de comportamento elástico não muda os resultados esperados de plastificação do *hanging wall* ou mesmo a variação de tensão no *rib* e *sill pillar*.

O enchimento com as propriedades de um material de baixa resistência, porém extremamente deformável, transmitirá sua deformação aos materiais adjacentes, como *hanging wall*, mesmo que aquele não mostre os elementos de plastificação que se esperaria em um material daquele tipo.

Dentro do objetivo do trabalho de expor o aumento que pode haver de tensão nos pilares locais e regionais, é importante que o *software* em questão não considere em nenhum momento os parâmetros residuais nos pilares, para que não seja mascarado o resultado de aumento ou diminuição das tensões resultantes após a lavra nos painéis.

4.1 RS3

O *software* RS3™ da Rocscience™ para análises tridimensionais de estruturas geotécnicas para aplicações civis e indústria da mineração, usa o método dos elementos finitos em suas análises, considerando o sequenciamento de lavra, instalação de suporte, carregamentos e vários outros aspectos de modelagem.

Na figura 1 é mostrado um *overview* do modelo estudado neste trabalho, na etapa de restrição das laterais do volume que marca o limite dos elementos de cálculo do *software*.

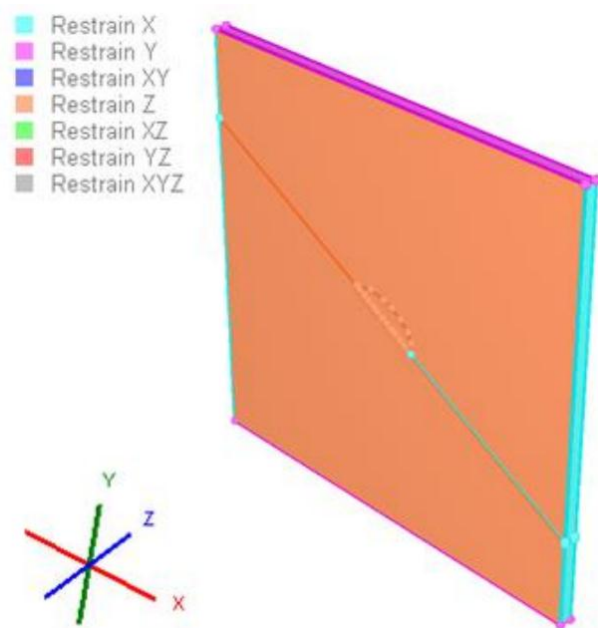


Figura 1. *Overview* do modelo no sequenciamento do método *bottom up* em comparação com a envoltória de dano do sequenciamento em *top down*, no *software* RS3.

4.2 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 foram baseados em ensaios de laboratório e mapeamentos geológico-geotécnicos na mina Cuiabá e calibrados no trabalho que a Coffey Mining realizou na mina em 2013. Os dados de entrada estão detalhados na tabela a seguir:

Tabela 1. Propriedades do maciço rochoso.

Parâmetro	Unid.	Xisto	BIF / MCH	Backfill
UCS	MPa	64	220	0,5
GSI	MPa	55	80	-
Módulo de Young	GPa	20	50	0,3
Poisson	-	0,23	0,17	-
mb	Graus	2,406	9,791	-
S	MPa	0,01	0,117	-

Para fins de modelagem numérica, foi assumida a utilização de dados de tensão *in situ* da mina Cuiabá, do ano de 2004, medidos através do método de sobrefuração (*overcoring*), durante o projeto de expansão da mina. 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 $\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h$, 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 $k=1,5$ (tabela 2).

Tabela 2. Dados de entrada do campo de tensões no *software*.

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

5 RESULTADOS

Após realizar a modelagem numérica de três painéis típicos da mina Cuiabá, foram obtidos os dados de plastificação e tensão principal em cada um dos métodos.

O sequenciamento no *top down* foi simples, lavrando cada um dos 11 stopes do nível de cima pra baixo. No caso do *bottom up*, o sequenciamento é mais complexo por envolver o enchimento. A lavra dos 11 stopes foi realizada seguindo os passos abaixo:

- 1: Lavra do *stope* ligando 2 subníveis;
- 2: Enchimento do *stope* até o piso da galeria superior;
- 3: Lavra do segundo *stope*;
- 4: Enchimento do segundo *stope* até o piso da galeria superior.

O sequenciamento continua desta forma até a lavra de todo o painel.

Quando se pretende ver o efeito do enchimento ou a solicitação dos elementos de contenção e reforço no *software* que usa o método dos elementos finitos, o uso do enchimento ou reforço deve ser feito em uma etapa anterior a próxima lavra. Assim quando a escavação é feita, o efeito dela passa a ser assimilado no *backfill* ou tirantes, por exemplo.

Ao final do sequenciamento de ambos os

métodos, foi feito primeiramente a comparação da zona plastificada. Foi plotado no *software* a envoltória da zona plastificada no modelo que considerou a lavra em *top down* e os pontos de plastificação do modelo que considerou a lavra em *bottom up*. Na figura 2 a seguir, é possível perceber uma diferença de 12 metros na zona de dano entre os métodos considerando o estado de tensões relativo ao nível 9 da mina Cuiabá, ou 600 metros abaixo da superfície.

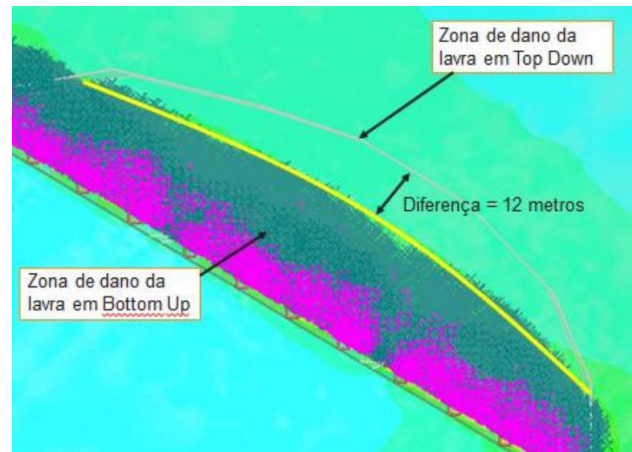


Figura 2. Resultado do modelo no sequenciamento do método bottom up em comparação com a envoltória de dano do sequenciamento em top down.

Após a definição do efeito do sequenciamento no *hanging wall* considerando o mesmo vazio na lavra final, foi realizado o estudo das tensões principais nos pilares (*rib* e *sill*). Para isso, o mesmo modelo foi rodado em diferentes campos de tensão para que fossem simulados os efeitos nas profundidades de 400, 600, 800 e 1000 metros abaixo da superfície e assim encontrar uma correlação que permita a extrapolação dos resultados para outros níveis da mina (figura 3 e 4).

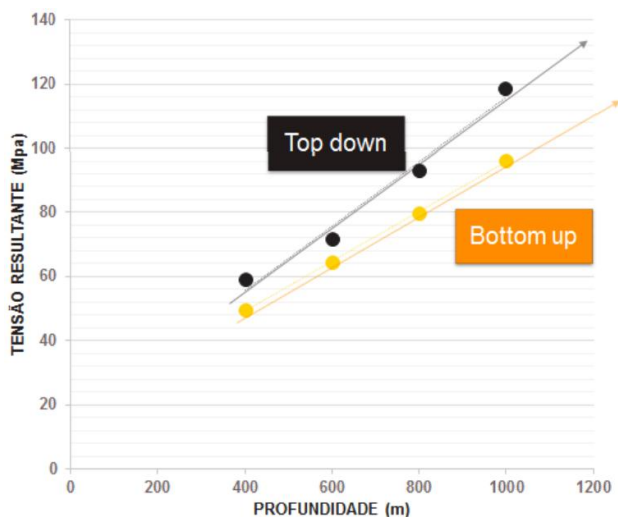


Figura 3. Gráfico com a plotagem dos pontos de tensão no núcleo do *rib pillar* mais central do modelo em diferentes profundidades.

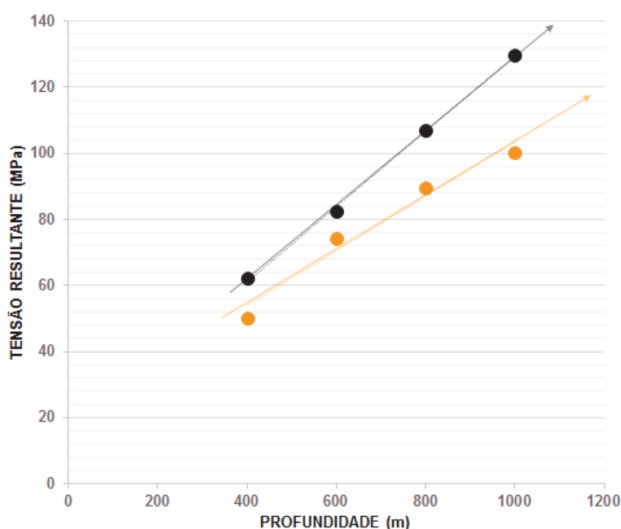


Figura 4. Gráfico com a plotagem dos pontos de tensão no núcleo do *sill pillar* mais central do modelo em diferentes profundidades.

Os valores de tensão principal usados para chegar ao gráfico de comparação, foram retirados do núcleo do pilar mais central, seja no caso de *rib* ou *sill pillar*. Em ambos os gráficos, os pontos pretos mostram os valores retirados dos modelos que consideraram o sequenciamento em *top down*, enquanto os pontos amarelos mostram os valores retirados dos modelos que consideram o sequenciamento em *bottom up*. Entre as profundidades estudadas, entre 400 e 1000 metros, há uma relação aproximadamente linear no aumento da tensão principal, e apesar de ser claro o distanciamento entre as curvas, fica mantida uma relação entre

20 a 25% entre os pontos. Os valores encontrados nos modelos elastoplásticos mostram que o sequenciamento em *top down* faz a acumulação de tensão ficar muito alta após a lavra de vários painéis usando este método. Se considerarmos os parâmetros de resistência das rochas encaixantes da mina Cuiabá, é possível que este método se torne inviável a partir de 600 metros de profundidade. Ainda há a diminuição cada vez maior da recuperação do minério com o aumento dos pilares em número e espessura (*rib* e *sill*), considerando o aumento de até 25% na tensão aplicada nesses elementos. Além do aumento da zona de plastificação e da tensão nos pilares, há ainda questões não contempladas neste estudo, como o aumento da tensão induzida em rampas e acessos, que podem aumentar o suporte e reforço nas galerias e a distância das rampas principais e travessas. Sozinhos estes aumentos podem aumentar o custo a ponto de inviabilizar vários pontos da mina, significando a perda de recurso / reserva no curto, médio e longo prazo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos profissionais da AngloGold Ashanti, especialmente da Gerência Mecânica das Rochas, pelo apoio na realização do trabalho. Agradeço também ao Professor Rodrigo Peluci de Figueiredo, da Universidade Federal de Ouro Preto, pela parceria, discussões e opiniões ao trabalho desde o início de sua realização.

REFERÊNCIAS

- Brady, B.H.G. & Brown, E.T. (1985). *Rock Mechanics for Underground Mining*. Thrid Edition. Kluwer Academic Publishers, New York, USA.
- Coffey Mining (2013). 3D Numerical Modelling for AngloGold Ashanti, Cuiabá Mine. Privet Report.
- Crouch, S.L & Starfield, A.M. (1983). *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*. Allen & Unwin. London.
- Pereira, F.B. (2011). *Comportamento do Enchimento em Realces Verticalizados*. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto.
- RS3, User manual (2014). Rocscience, Canadá.