

Otimização da Unidade Mínima de Lavra para o Planejamento de Curto

Optimization of the Minimum Mining Unit for Short-Term Planning

Optimización de la Unidad Minera Mínima para Planificación de Corto Plazo

Recebido: 25/04/2022 | Revisado: 02/05/2022 | Aceito: 06/05/2022 | Publicado: 13/05/2022

Mariana Paula Rossini de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8303-916X>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: marianaaluap@gmail.com

Felipe Ribeiro Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6804-9589>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: felipe.souza@ufop.edu.br

José Margarida da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-7213>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: jms@ufop.edu.br

Resumo

Na mineração a céu aberto, no horizonte de curto prazo, é realizado a subdivisão dos planos de lavra em trimestral, mensal, semanal e diário da operação. Em um horizonte mensal, um planejador de curto prazo define as poligonais, que compreende os sucessivos avanços de lavra, satisfazendo parâmetros de qualidade e tonelagem de minério fixadas previamente pela usina. As poligonais, tradicionalmente, são projetadas sem uma devida abordagem sistemática. Logo, as interações realizadas para obter as especificações exigidas pela usina é limitada. Portanto, há uma demanda por estudos envolvendo técnicas de otimização de unidades mínimas de lavra, auxiliando o delineamento do minério, de modo a minimizar a variabilidade em teor e maximizar a recuperação da usina, além de fornecer base quanto a tomada de decisão diária pelo planejador de curto prazo. Esse artigo propõe a adaptação de dois algoritmos de otimização – Cone Flutuante e Stope Flutuante, tradicionalmente utilizados para a definição de cavas e realces subterrâneos. Foi atribuído um valor de dimensão igual a zero para os pilares de sustentação, aproximando o método de câmaras e pilares a um método de bancadas, para configurar um comportamento próximo a lavra em céu aberto. O estudo comprovou que ambas as metodologias apresentaram resultados satisfatórios. Apesar da necessidade de ajustes manuais, descartando blocos compartilhados, o Cone Flutuante mostrou ser um sistema mais seletivo, principalmente para teores de corte mais elevado.

Palavras-chave: Curto prazo; Otimização; Avanços de lavra; Otimização de Realces.

Abstract

In open pit mining, in the short term, the mining plans are subdivided into quarterly, monthly, weekly and daily operations. Monthly, the short-term planner defines the polygons, which comprise successive mining advances. These ore quality and tonnage parameters are previously determined by the mill. Traditionally, traverses are designed without a proper systematic approach. The interactions performed to obtain the specifications required by the plant are limited. There is a demand for studies involving optimization techniques for minimum mining units, helping the design of the ore, in order to minimize the variability in grade and maximize the recovery of the plant. This article proposes the adaptation of two optimization algorithms – Floating Cone and Floating Stope, traditionally used to define underground pits and highlights. A dimension value equal to zero was assigned to the support pillars, approaching the chambers and pillars method to a bench method, to configure a behavior close to open pit mining. The study proved that both methodologies presented satisfactory results. Despite the need for manual adjustments, discarding shared blocks, the Floating Cone proved to be a more selective system, especially for higher cut grades.

Keywords: Short term; Optimization; Mining advances; Stope Optimization.

Resumen

En la minería a cielo abierto, en el corto plazo, los planes de minado se subdividen en operaciones trimestrales, mensuales, semanales y diarias. Mensualmente, el planificador coyuntural define los polígonos, que comprenden los sucesivos avances mineros. Estos parámetros de tonelaje y calidad del mineral son determinados previamente por el molino. Tradicionalmente, las poligonales se diseñan sin un enfoque sistemático adecuado. Las interacciones realizadas para obtener las especificaciones requeridas por la planta son limitadas. Existe una demanda de estudios que involucren técnicas de optimización de unidades mínimas de minado, ayudando al diseño del mineral, con el fin de minimizar la variabilidad en la ley y maximizar la recuperación de la planta. Este artículo propone la adaptación de dos algoritmos

de optimización – Floating Cone y Floating Stope, tradicionalmente utilizados para definir tajos subterráneos y realces. Se asignó un valor de dimensión igual a cero a los pilares de apoyo, aproximando el método de cámaras y pilares a un método de banco, para configurar un comportamiento cercano a la minería a cielo abierto. El estudio comprobó que ambas metodologías presentaron resultados satisfactorios. A pesar de la necesidad de ajustes manuales, descartando bloques compartidos, el Cono Flotante demostró ser un sistema más selectivo, especialmente para leyes de corte más altas.

Palabras clave: Corto plazo; Mejoramiento; Avances mineros; Optimización de Apertura.

1. Introdução

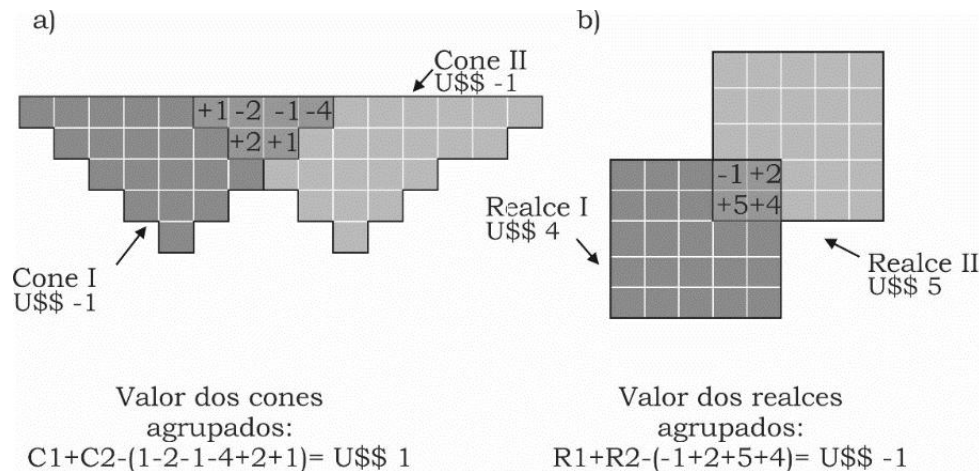
Uma das principais atribuições do planejamento de longo prazo consiste na definição da geometria da cava final, bem como a sequência em que os recursos devem ser extraídos dentro desse limite (Chicoisne et al., 2012). Entretanto, no planejamento de curto prazo ocorre uma reavaliação dos teores dos blocos proveniente de amostras de malhas mais adensadas, e é definido uma sequência de lavra do recurso por bancadas, estabelecendo quais, quando e como os blocos serão lavrados; e, se lavrados, para onde serão enviados.

Portando, a equipe de planejamento de curto prazo recebe anualmente, do planejamento de longo prazo, um plano de lavra anual e a subdivide em planos de lavra trimestral, mensal, semanal e diário (Chicoisne et al., 2012). Devido os algoritmos de otimização no planejamento de curto prazo não utilizarem modelos de blocos, é comum projetar polígonos, sem devida abordagem matemática (Torres, 2018). Esses polígonos configuram os sucessivos avanços de lavra, em volumes que possam satisfazer as premissas (como teor, percentual de contaminantes, tonelagem de minério, etc.) fixadas pela planta de beneficiamento mineral (Blom et al., 2019). Como, tradicionalmente, a definição dos polígonos é feita de forma manual, o número de interações para atingir as premissas e a meta de qualidade do minério é limitada, podendo acarretar em aumento de custos do processo mineral.

Entretanto, vários algoritmos foram desenvolvidos para a definição matemática dos limites ótimos de realces para minas subterráneas. Um dos algoritmos que serão abordados nesse artigo é o Floating Stope, comercialmente disponível no software da Datamine na ferramenta MRO (Mineable Reserves Optimizer). Esse algoritmo, muito semelhante ao método do Cone Flutuante, possibilita a definição de envoltória, ou limites, dos realces projetados (Erdogan et al., 2017).

O Cone Flutuante avalia o valor econômico dos blocos individualmente. Blocos inviáveis economicamente, contudo, quando avaliados em conjunto, podem ser rentáveis. A técnica do Floating Stope tem limitação oposta. Dois realces sobrepostos avaliados individualmente podem ser viáveis economicamente, devido a presença de blocos com alto teor. Todavia, ao avaliar conjuntamente a combinação pode tornar-se antieconômica (Ataee-pour, 2005). Consequentemente, os valores econômicos dos blocos são somados mais de uma vez, a depender do número de sobreposições.

Figura 1 - Limitações da técnica do Cone Flutuante e do Realce Flutuante. (a) Cones I e II são antieconômicos, todavia, econômicos ao serem combinados; (b) os realces I e II são econômicos individualmente, porém antieconômicos quando combinado.



Fonte: Ataee-pour (2005).

Além do algoritmo Floating Stope, discutiremos também sobre o algoritmo embutido na ferramenta MSO (Mineable Shape Optimizer), também disponível no software Datamine – com a adição de novas funcionalidades, essa nova ferramenta é capaz de produzir detalhados estudos de layout de realces subterrâneos (Dimitrakopoulos & Grieco, 2009).

Em ambas as metodologias, uma unidade, que corresponde ao menor volume e forma que é operacionalmente lavrável (unidade mínima de lavra), flutua sobre o modelo de blocos, obedecendo aos incrementos ao longo das direções ortogonais ao modelo, identificando posições que atendem ao critério de otimização. Para cada bloco acima do teor de corte, a variável otimizada é calculada pela média dos valores que se enquadram dentro desse limite. Após avaliar as posições em potencial, o algoritmo simula expansões das fronteiras da envoltória, adicionando blocos adjacentes de modo a contribuir com a valorização do critério adotado.

A envoltória externa (ou máxima) abrange um percentual maior de tonelagem. No entanto, é a envoltória interna (ou mínima) que fornece um teor médio mais elevado.

A partir da análise crítica dos algoritmos de otimização de realces em minas subterrâneas, propõe-se então uma metodologia estratégica, capaz de fornecer subsídios na tomada de decisão do planejamento de curto prazo em cavas para definição das poligonais de lavra. Possibilitando melhor recuperação do recurso mineral e atendendo as premissas definidas pela planta de beneficiamento.

2. Metodologia

O presente estudo implementou o algoritmo *Floating Stope*, presente na ferramenta denominada MRO (*Mineable Reserves Optimizer*), e, um segundo algoritmo - o qual contém mais funcionalidades que o primeiro, existente na ferramenta designada MSO (*Mineable Shapes Optimizer*) em um modelo de bloco fictício, o qual serve apenas para desenvolvimento da metodologia proposta. Parâmetros econômicos, geológicos e operacionais foram aplicados ao modelo de blocos geológico para obtenção desse modelo econômico. A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros econômicos.

Tabela 1 - Parâmetros econômicos aplicados ao modelo de blocos geológico.

Parâmetro	Unidade	Valor
Preço de venda	U\$\$/t	70,0
Preço de custo de venda	U\$\$/t	15,0
Custo de lavra	U\$\$/t	2,2
Custo de processos	U\$\$/t	10,0

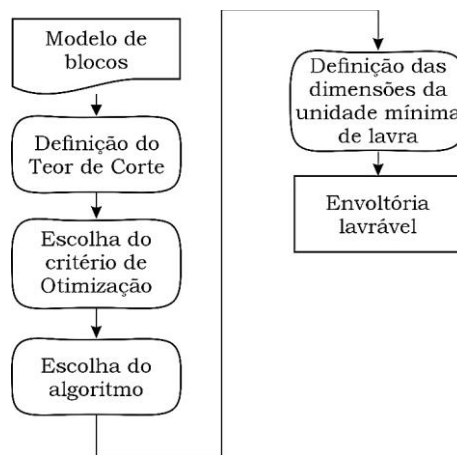
Fonte: Autores.

O método de Câmaras e Pilares foi considerado como o método de mineração subterrâneo semelhante a lavra de bancada. Dimensão igual a zero para os pilares de sustentação dos realces foi utilizado, para aproximar-se de uma lavra a céu aberto.

2.1 Floating Stope - Mineable Reserves Optimizer (MRO)

Foi especificado uma dimensão mínima (que corresponde ao mesmo valor da dimensão dos blocos contidos no modelo), igual a 20 x 20 x 10m. Esse limite flutuou sobre o modelo de blocos, respeitando os incrementos iguais a 10m x 10m x 10m para as três direções ortogonais, X, Y e Z. Para cada bloco acima do teor de corte, uma ou mais posições foram avaliadas de modo a verificar se atendem ao critério estipulado, no caso, a maximização de teor de ferro. Os três algoritmos contidos na ferramenta foram testados para melhor compreensão e análise da metodologia ora proposta. Ao todo, foram criados 15 cenários para cada um dos três algoritmos listados. A Figura 2 apresenta um fluxograma resumido do processo relatado anteriormente.

Figura 2 - Fluxograma com a metodologia embutida no Floating Stope.



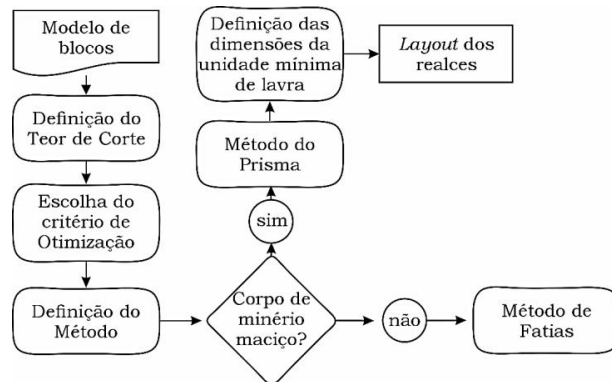
Fonte: Autores.

2.2 Floating Cone - Mineable Shape Optimizer (MSO)

Análogo ao processo anterior, foi especificado o tamanho inicial das dimensões e incrementos das unidades mínimas de lavra. Para essa análise foram avaliados dois critérios de otimização: a maximização de metal contido, o qual gera maior volume de reserva, reduzindo a margem de lucro operacional da empresa, em decorrência da redução do teor médio; e a maximização de teor, o qual retorna um maior valor financeiro, ao selecionar apenas blocos classificados como minério.

Para o presente trabalho utilizaremos o método do prisma devido a característica do depósito. A Figura 3 revela um fluxograma resumido da metodologia apresentada.

Figura 3 - Fluxograma com a metodologia embutida no MSO.



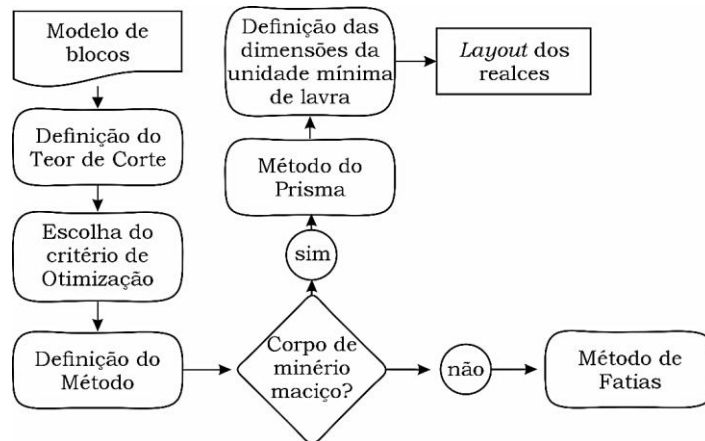
Fonte: Autores.

2.3 Floating Cone - Mineable Shape Optimizer (MSO)

Análogo ao processo anterior, foi especificado o tamanho inicial das dimensões e incrementos das unidades mínimas de lavra. Para essa análise foram avaliados dois critérios de otimização: a maximização de metal contido, o qual gera maior volume de reserva, reduzindo a margem de lucro operacional da empresa, em decorrência da redução do teor médio; e a maximização de teor, o qual retorna um maior valor financeiro, ao selecionar apenas blocos classificados como minério.

Para o presente trabalho utilizaremos o método do prisma devido a característica do depósito. A Figura 4 revela um fluxograma resumido da metodologia apresentada.

Figura 4 - Fluxograma com a metodologia embutida no MSO.



Fonte: Autores.

3. Revisão Teórica

3.1 Diluição

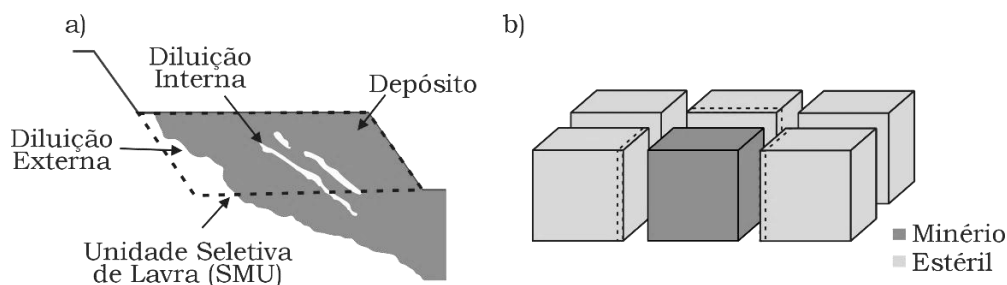
A diluição, definida como a inclusão de estéril ou minério de baixo valor agregado processado junto ao material lavrado. Desencadeando oscilação nos parâmetros de teor e massa, causando aumento nos custos de processos de tratamento de minérios e redução na tonelagem, tendo impacto direto no valor presente líquido do empreendimento (Ebrahimi, 2013). Isso pode ser explicado devido ao fato de um menor teor de alimentação ocasionar uma menor recuperação da planta de beneficiamento, reduzindo a capacidade efetiva da usina e aumentando custos da operação.

A diluição pode ser classificada em três categorias, são elas: diluição interna (planejada), diluição geológica (ou in situ) e diluição operacional (não planejada). A diluição interna se refere a presença de estruturas geológicas de baixa qualidade contidas nos limites do bloco classificado como minério, e que são inevitavelmente extraídas durante a lavra (Câmara, 2013). A diluição externa, denominada também como diluição de contato, refere-se ao material de baixa qualidade disposto fora dos limites da unidade de lavra (Ebrahimi, 2013). A sua influência será em função de quão abrupta será a mudança de teores no contato.

A diluição operacional é definida como a inclusão de material de baixa qualidade no momento da lavra, devido à incapacidade operacional de separar, de forma eficiente, o minério e estéril com os equipamentos disponíveis. A diluição operacional pode ser resultado do dimensionamento incorreto dos equipamentos, somados a indestreza do operador durante a lavra (Câmara, 2016). Por mais nítido que seja, e mesmo operando com recursos tecnológicos, a exemplo do *Global Positioning System* (GPS), o equipamento e o operador não conseguem separar eficientemente os materiais durante a lavra, dado que o equipamento possui limitações em seguir uma linha de escavação demarcada (Rossi & Deutsch, 2014).

A Figura 5 (b) revela um exemplo de diluição operacional. Nela, um bloco de minério é influenciado por outros cinco blocos de estéril contíguos a ele. O bloco de minério dificilmente será extraído sem que seja retirado alguma fração dos blocos de estéril, dado que o equipamento possui limitações em seguir a linha de escavação demarcada. A Figura 5 (a) revela a ocorrência de diluição externa e interna em uma unidade mínima de lavra.

Figura 5 - Unidade mínima de lavra em uma mina a céu aberto evidenciando (a) diluição interna e externa, e (b) diluição operacional.



Fonte: Ebrahimi (2013); Câmara, (2013).

3.2 Break Even

O teor de corte é um dos parâmetros técnicos e econômicos mais importantes que influenciam no valor de um projeto de mineração (Krzanovic, 2015). É definido como o teor mínimo da substância útil no qual o bloco apresenta receita suficiente para liquidar todos os custos envolvidos em todos o processo, ou seja, custos de lavra, tratamento de minérios, refino, bem como custos gerais e administrativos da empresa (Gomide, et al., 2018). Em termos práticos, o teor de corte irá compor um dos itens necessários para distinguir os blocos de estéril, minério marginal e minério, bem como definir o destino final para cada um deles (Fontoura, 2017).

O cálculo do teor de corte incorpora parâmetros econômicos, geológicos e operacionais. Os parâmetros econômicos contemplam o preço de venda do metal/minério, custos de comercialização e/ou vendas, custos do processo mineral, custos fixos e a taxa de atratividade adotada no projeto. O modelo de blocos fornece informações relativas à geologia. Nele encontramos atributos quanto a localização espacial, teor médio e tonelagem associada a cada bloco pertencente ao modelo. E, finalmente, os parâmetros operacionais que englobam a capacidade de lavra, processamento, refino e recuperação metalúrgica.

Em minas a céu aberto, é possível identificar dois valores para o teor de corte (Runge, 1998). O primeiro é definido como teor de corte de equilíbrio (ou *breakeven*) e compreende o teor mínimo cuja receita gerada pela venda do produto é suficiente para pagar todos os custos envolvidos no processo (Souza & Melo, 2014). Esse termo é adequado A Equação 1 caracteriza o teor de corte de equilíbrio.

$$g = \frac{M_m + P_m + O_m}{y \cdot (s - r)} \quad (1)$$

Onde,

M_m é o custo de lavra de uma tonelada do material a ser processado;

P_m é o custo de processamento do material;

O_m é o custo de atividades de apoio a operação, custos gerais e administrativos;

y é a recuperação metalúrgica do material lavrado;

s é o preço de venda do produto recuperado;

r é o custo de venda do produto.

3.3 Teor de corte marginal

Já o teor de corte marginal refere-se aos blocos que apresentam condições tecnológicas e econômicas para serem processados, porém, devido a questões de custos de mineração ou preço de venda, no momento de análise não vale a pena ser lavrado, transportado e processado. A equação 2 caracteriza o teor de corte marginal.

$$g_{\text{marginal}} = \frac{P_m + O_m}{y \cdot (s - r)} \quad (2)$$

3.4 Floating Stope

Delineado por Christopher Alford no ano de 1995, o algoritmo Floating Stope possibilita a projeção de limites nos quais os realces devem ser projetados. É capaz de fornecer uma estimativa preliminar de reservas subterrâneas ou a céu aberto (Erdogan, 2017). O termo Floating Stope é procedente da técnica de flutuar uma forma mínima e predefinida de lavra, respeitando um incremento ao longo das direções ortogonais, localizando posições que satisfaçam o critério da otimização - critério esse que pode ser a maximização de metal contido, teor ou tonelagem de minério (Ataee-pour, 2005).

A escolha de uma ou mais posições em potencial depende sobretudo da classificação do bloco contido no modelo. Após avaliar posições em potencial, o algoritmo realiza simulações da expansão das fronteiras do envoltória lavrável (Silva, 2008). O algoritmo verifica se podem ser adicionados blocos vizinhos a ele de maneira a contribuir para a valorização do critério adotado. Ao todo, existem três algoritmos com metodologias distintas quanto a seleção e a incorporação de novos blocos ao limite projetado (Corporation, 2019), são eles:

- Envoltória classificado: todas as possíveis posições para projetar o realce são identificadas e classificadas. O limite com maior valor é selecionado e, em seguida, cada limite subsequente é aceito, se, somente se, o incremento (média dos possíveis blocos a serem combinados) estiver acima do teor de corte.
- Envoltória mínimo (ou interno): as posições em potencial são definidas a partir de blocos que possuem um teor acima do teor de corte, logo, a classificação dos blocos é que vai ditar os limites em potenciais a serem combinados;
- Envoltória máximo (ou externo): refere-se ao limite encontrado ao testar todas as posições possíveis para o limite, podendo o bloco ser classificado como estéril ou minério. Caso esse limite satisfaça os parâmetros de teor de corte, ele é selecionado e novas combinações são avaliadas.

As envoltórias fornecem uma referência para engenheiro de curto prazo projetar as posições finais do realce matemático (Alford et al., 2007). É importante se atentar que, a envoltória externa, apesar de retornar um menor valor financeiro,

ele gera maior tonelagem de minério. Ao passo que a envoltória interna (ou mínimo) fornece um teor médio mais elevado. Logo, é a envoltória mínima o limite mais recomendado para se projetar o realce matemático.

A principal desvantagem do algoritmo *Floating Stope* é que ele gera compartilhamento de blocos. Portanto, os resultados gerados exigem ajustes manuais para descartar blocos compartilhados no *layout* final. Após o descarte dos blocos, o valor econômico derivado desse limite será diferente do valor econômico real gerado pelo algoritmo. Assim, este algoritmo não garante uma solução ótima global.

3.5 *Floating Cone*

Para corrigir o problema observado no algoritmo *Floating Stope*, o *Floating Cone* foi projetado. Essa ferramenta permite a inserção de parâmetros que detalham o método de mineração e do projeto, fornecendo a localização, forma e dimensão dos realces que maximizam o critério otimizado.

Diferente da metodologia anterior essa ferramenta já desempenha e reproduz a função dada ao engenheiro de planejamento de curto prazo, concebendo formas lavráveis que maximizem a função objetivo. A técnica dispõe de dois métodos de otimização mutuamente disponíveis. A seleção do método depende sobretudo da geologia e orientação do corpo mineral (Bootsma, 2013). Os principais métodos é o Método de Fatias e Método do Prisma.

O Método de Fatias é adequado para corpos de minério estreitos, tabulares, corpos lenticulares paralelos ou subparalelos verticais ou subverticais (Bootsma, 2013). A fatia, objeto de análise desse método de otimização, compreende a menor unidade de mineração. É caracterizada como sendo o menor volume que pode ser lavrado seletivamente. A mesma dispõe de uma largura e altura que são equivalentes às dimensões do realce. Quanto menor a espessura da fatia, mais precisa será a forma básica do realce (Bootsma, 2013).

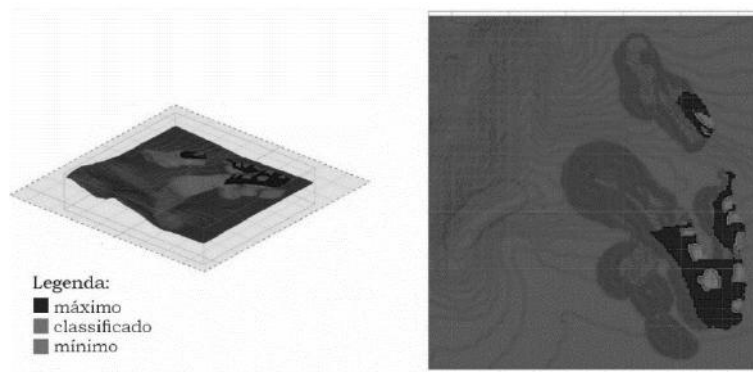
O otimizador gera fatias com espessura predefinidas ao longo da direção transversal do corpo de minério. O volume, a tonelagem e o teor médio são registrados temporariamente e a ferramenta simula os agrupamentos de fatias adjacentes de modo a atender aos critérios de otimização (Bootsma, 2013).

Já o Método do Prisma é aplicável a corpos maciços. O método combina de maneira ideal um conjunto de formas sem que haja a sobreposição. O objetivo da otimização é selecionar o conjunto de formas não sobrepostas que maximizem o valor do realce.

4. Discussão dos Resultados

A Figura 6 exhibe os resultados do *Floating Stopes*, foi destacado um plano horizontal na cota $Z = 800\text{m}$, e revela a configuração das envoltórias mínimo, máximo e classificado (quando um teor de corte equivalente a 2% Fe é aplicado). Observa-se que a envoltória classificado e mínimo são um subconjunto da envoltória máxima. Logo, a diferença entre a envoltória classificado ou mínimo e a envoltória máxima é um minério marginal que poderia vir a ser lavrado, gerando maior reserva com redução da margem bruta operacional da empresa.

Figura 6 - Envoltória máxima, classificada e mínima.



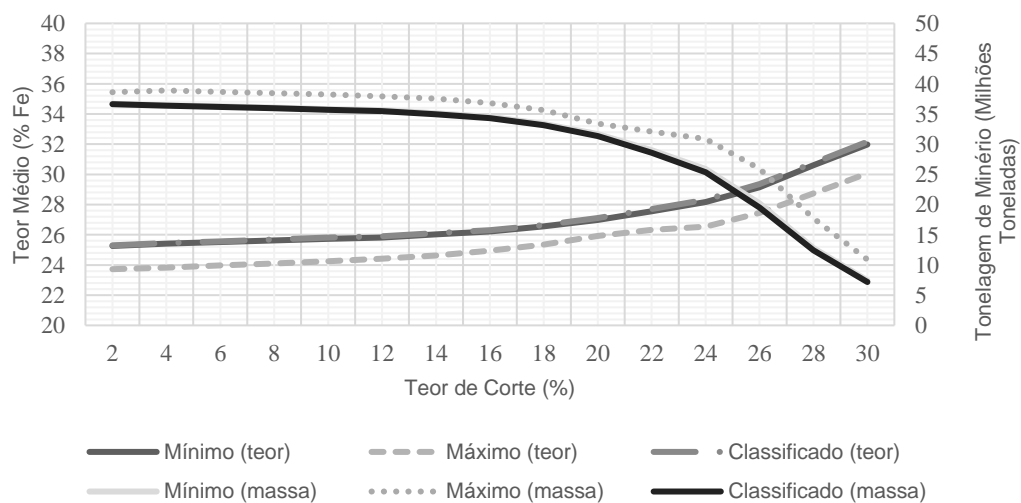
Fonte: Autores.

A envoltória máxima é caracterizada como sendo o limite obtido ao testar todos os blocos, sejam eles classificados como estéril ou minério – então, a soma de todos os blocos contidos dentro desse limite pode ou não ser antieconômica. Logo, o planejador de curto prazo, ao definir as poligonais que contemplam os avanços de lavra, deve se basear na envoltória classificada ou mínima, porém deve respeitar os limites estabelecidos pela envoltória máxima.

A Figura 7 revela uma análise de sensibilidade dos parâmetros teor médio e tonelagem de minério com a variação do teor de corte. Constatou-se que a variação de teor de corte ocasionou um comportamento similar para os três algoritmos analisados. Isto é, houve uma redução na tonelagem de minério e um aumento do teor médio em decorrência do aumento gradativo do teor de corte. Isso porque a massa que antes era considerada como minério e poderia ser lavrada, após o aumento do teor de corte, passa a não ser.

Corroborando com as considerações anteriores, houve uma diferença pequena ao comparar os resultados das envoltórias mínima e classificada. Essa diferença foi na ordem de 0,67% e 3,28% para a massa de minério e teor médio, respectivamente. Quando comparado com o resultado alcançado pela envoltória máxima, houve uma diferença mais expressiva, na ordem de 28,12% na massa de minério e 6,72% no teor médio ao comparar com os cenários gerados com o algoritmo classificada, para um teor de corte igual a 26% Fe.

Figura 7 - Resultados gerados no MRO.

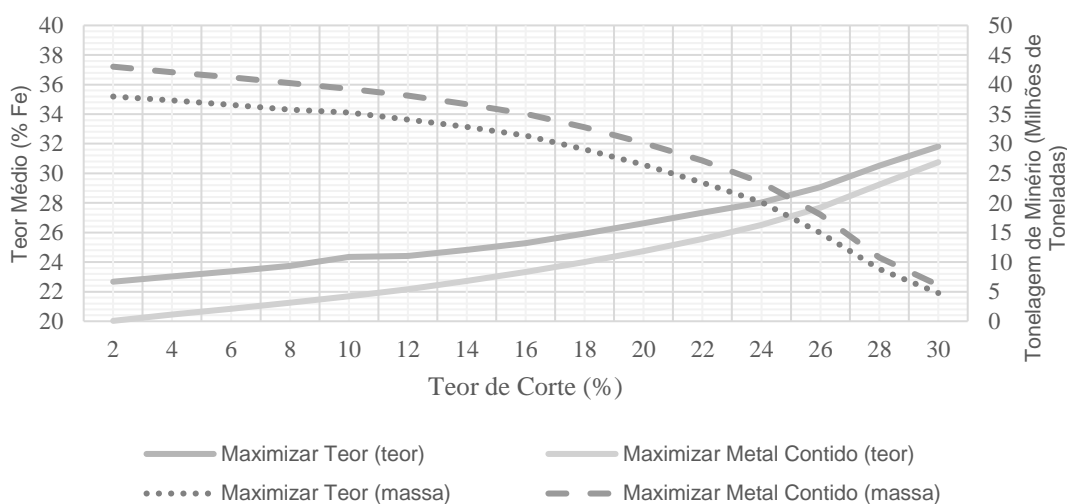


Fonte: Autores.

Os resultados dos cenários usando os critérios maximização de metal contido e maximização de teor, acessíveis na ferramenta MSO, também foram avaliados e os seus resultados foram apresentados na Figura 8. O gráfico revela um comportamento semelhante àquele discutido anteriormente - o aumento do teor de corte acarreta redução na tonelagem de minério e o aumento do seu valor agregado. Ademais, constatou-se diferenças percentuais entre ambos na ordem de 4,95% e 18,86%, para o teor médio e tonelagem de minério, respectivamente.

A razão dessas diferenças pode ser explicada devido o critério maximização de metal contido aceitar a incorporação de blocos com teores marginais, gerando maior reserva, e, conseqüentemente, reduzindo a margem bruta operacional da empresa em decorrência da redução da função benefício. Já o critério maximização de teor, diferente do primeiro, prioriza a seleção de blocos acima do teor de corte, retornando um maior valor financeiro. Logo, esse último é a principal escolha dos empreendimentos do setor mineral, visto que, apesar de produzir menor tonelagem, retorna um valor econômico maior.

Figura 8 - Resultados gerados no MSO.



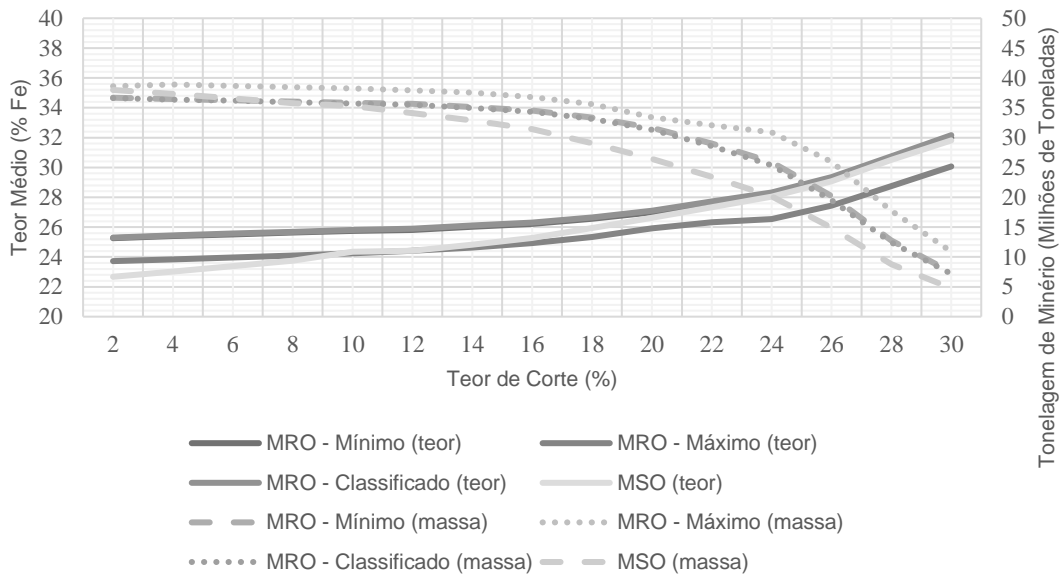
Fonte: Autores.

A Figura 8 apresenta a análise dos resultados gerados pelos cenários dos algoritmos, cenários no qual foram empregues o critério maximização de teor. De modo geral, os resultados ressaltam que a distância média entre as retas do gráfico para teor e tonelagem de minério obtido pelos cenários utilizando o algoritmo mínimo, máximo e classificado (presentes no *Floating Stope*) é uniforme, ou seja, parece não ser muito sensível a diferentes faixas de teor de corte. Fato esse que não ocorre no *Floating Cone*, a distância entre as retas diminui a medida que aumentamos o teor de corte. Logo, para teores de corte mais elevados não há mudanças significativas no teor médio e tonelagem de minério.

Além disso, foi observado também que os resultados gerados pelo MSO ficaram abaixo daqueles apresentados pelas envoltórias mínima e classificada. Para um teor de corte inferior a 22% Fe, os resultados gerados na envoltória mínima e classificada foram superiores aos obtidos pelo MSO. Além disso, a ferramenta MRO forneceu valores mais expressivos de tonelagem de minério. Tal fato ocorre devido o MRO gerar blocos compartilhados no *layout* final, necessitando da entrada de um engenheiro para ajuste manual.

Esse compartilhamento de blocos, acarreta na superestimativa dos parâmetros, como por exemplo teor médio e tonelagem de minério. Após a sua correção manual, o valor econômico derivado desse limite será distinto daquele valor real. Logo, esse algoritmo não garante uma solução ótima; mas próxima a ela.

Figura 9 - Comparativo dos cenários gerados pelas ferramentas MSO e MRO.



Fonte: Autores.

5. Conclusão

Os algoritmos para otimização de realces subterrâneos podem ser adaptados de modo a automatizar rotinas de trabalho até então realizadas de forma manual, mas com maior eficiência e garantia da qualidade do produto a ser entregue na planta de beneficiamento mineral em minas a céu aberto.

De modo geral os resultados revelam que nenhuma das metodologias apresentadas possibilitam soluções ótimas globais, fornecem soluções ótimas locais. Constatou-se também que cada metodologia avalia as posições em potencial e gera um conjunto de formas lavráveis com base na sua estratégia de otimização.

Ademais, os resultados obtidos mediante ao uso do algoritmo classificado ou mínimo são um subconjunto da envoltória máxima. Isto é, o incremento entre as envoltórias classificada ou mínima e máxima é um minério classificado como teor marginal que poderia ser agregado a envoltória de modo a estender a vida útil do depósito. Contudo, sua inclusão acarreta em redução na margem bruta operacional da empresa, devido à redução do teor médio. Foi constatado que os resultados das envoltórias classificadas foram superiores àqueles apresentados pelos cenários da envoltória mínima, logo o algoritmo classificado é uma estratégia a ser adotada pelo planejador de curto prazo para a definição de poligonais visando a maximização da função benefício, visto que o resultado gerado por essas envoltórias possui um maior valor agregado.

Observou-se também que as variáveis teor médio e tonelagem de minério obtidas utilizando o algoritmo mínimo, máximo e classificado não são muito sensíveis a variação do teor de corte, visto que a distância média entre as retas do gráfico para teor e tonelagem permaneceram constantes. Quanto a ferramenta MSO, verificou-se que é uma metodologia mais operacional e mais adequada para conter os níveis de diluição. Além do mais, é uma ferramenta mais versátil, uma vez que considera orientação do corpo geológico, além de satisfazer restrições geotécnicas impostas ao projeto.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a CAPES, Instituto Tecnológico Vale e Datamine pelo suporte no desenvolvimento da pesquisa. Pois consideramos que o suporte foi determinante para a finalização do trabalho desenvolvido.

Referências

- alford, C., Brazil, M., & Lee, D. H. (2007). Optimisation in Underground Mining. In *Handbook of Operations Research In Natural Resources* (pp. 561–577). Springer International Publishing.
- Ataee-pour, M. (2005). A Critical Survey of the Existing Stope Layout Optimization Techniques. *Journal of Mining Science*, 41(5), 447–466. <https://doi.org/10.1007/s10913-006-0008-9>
- Blom, M., Pearce, A. R., & Stuckey, P. J. (2019). Short-term planning for open pit mines: a review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(5), 318–339. <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1448248>
- Bootsma, M. T. (2013). *Cut-off Grade Based Sublevel Stope Mine Optimization: Introduction and evaluation of an optimization approach and method for grade risk quantification*. Delft University of Technology.
- Câmara, T. R. (2016). *Quantifying dilution caused by execution efficiency*. 69(4), 487–490.
- Câmara, T. R. (2013). *Sistematização do cálculo de diluição e perdas operacionais para reconciliação de teores e massas em larva a céu aberto*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Chicoisne, R., Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., & Rubio, E. (2012). A New Algorithm for the Open-Pit Mine Production Scheduling Problem. *Operations Research*, 60(3), 517–528. <https://doi.org/10.1287/opre.1120.1050>
- Corporation, D. (2019). *Datamine Corporate Studio UG*. <https://www.dataminesoftware.com>
- Dimitrakopoulos, R., & Grieco, N. (2009). Stope design and geological uncertainty: Quantification of risk in conventional designs and a probabilistic alternative. *Journal of Mining Science*, 45(2), 152–163. <https://doi.org/10.1007/s10913-009-0020-y>
- Ebrahimi, A. (2013). The importance of dilution factor for open pit mining projects. *World Mining Congress*.
- Erdogan, G., Cigla, M., Topal, E., & Yavuz, M. (2017). Implementation and comparison of four stope boundary optimization algorithms in an existing underground mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 31(6), 389–403. <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1331083>
- Fontoura, D. M. (2017). *Método para auxílio na definição da quantidade de minério liberado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Gomide, C. S., Coelho, T., Trocate, C., & Milanez, B. (2018). *Dicionário crítico da mineração* (1st ed.). Marabá: IGUANA.
- Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2014). Mineral resource estimation. *Mineral Resource Estimation*, 1–332. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5717-5>
- Runge, I. C. (1998). *Mining economics and strategy*. SME.
- Silva, N. C. S. (2008). Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais. *Escola Politécnica Da Universidade de São Paulo*, 118.
- Souza, F. R., & Melo, M. (2014). Mining. *REM*, 67(4), 389–395.
- Torres, A. (2018). *Desenho de Polígonos e Sequenciamento de Blocos de Minério para Planejamento de Curto Prazo Procurando Estacionarização dos Teores*. Federal University Of Rio Grande do Sul.