

Um Modelo para o Planejamento Operacional da Lavra com Alocação de Equipamentos de Carga e considerando Pilha de Estoque

Arthur Quintão de Andrade (Universidade de São Paulo) arthurquintao@usp.br
Miguel Cezar Santoro (Universidade de São Paulo) santoro@usp.br

Resumo:

Este trabalho desenvolve um modelo em programação linear inteira mista, aplicado a um problema de planejamento da produção em uma mina a céu aberto, onde o principal objetivo a ser alcançado é determinar o ritmo (t/h) em cada frente de lavra, limitado à capacidade operacional do equipamento de carga, oferecendo à usina de beneficiamento a quantidade e a qualidade pré-estabelecidas. Onde cada frente de lavra, possui características de qualidade distintas e a mistura proveniente de cada frente de minério deve suprir à usina de forma adequada. Neste estudo uma frente de lavra torna-se ativa quando um equipamento de carga é alocado a um bloco de material, minério ou estéril. Nessa alocação, objetiva-se minimizar a distância a ser percorrida entre o local atual do equipamento e o bloco de destino. O modelo matemático considera a existência de uma pilha de estoque, denominada pilha de ROM, que visa suprir a usina de beneficiamento quando não houver minério disponível. O modelo desenvolvido foi implementado em VISUAL STUDIO C++ utilizando o solver do CPLEX 12.51.

Palavras chave: Planejamento de Lavra, Pilha de ROM, Programação Linear Inteira Mista.

A Model for Operational Planning of Mining with Load Allocation and with Stockpile

Abstract:

This paper develops a model in mixed integer linear programming, applied to a problem of production planning in an open pit mine, where the main objective to be achieved is to determine the run (t/h) in each bench, limited to operational capability of loading equipment, offering the processing plant with the quantity and quality pre-established. Where each bench, has distinct characteristics and quality blend made from the front of each ore to supply the plant appropriately. This study a bench becomes active when a load equipment is allocated to a block of material, ore or waste. In this allocation, the objective is to minimize the distance to be traveled between the current location of the equipment and the target block. The mathematical model considers the existence of a stockpile, called ROM stockpile, which aims to supply the processing plant when no ore available. The model was implemented in VISUAL STUDIO C++ using the CPLEX solver 12.51.

Keywords : Mining Planning, ROM StockPile, Mixed Integer Linear Programming.

1. Introdução

O principal objetivo do planejamento de produção em uma mina a céu aberto é a determinação de um ritmo de lavra que será implementado em cada frente, fornecendo um produto adequado ao cliente, seja a usina de beneficiamento (cliente interno) ou o próprio cliente final. Para viabilizar a utilização de determinada lavra, uma mina possui uma frota de equipamentos de carga que devem ser alocados conforme produtividade e sua disponibilidade (COSTA et al, 2005).

Além disso, outros critérios devem ser avaliados, como o controle de custos de operação, a maximização da utilização dos recursos, a garantia de segurança e a manutenção da vida útil da mina (AMARAL, 2008).

O carregamento do material é realizado por pás carregadeiras e escavadeiras que são direcionadas a diferentes pontos da mina e são responsáveis por realizar movimentos de "caçambadas", com intuito de encher cada caminhão alocado a esta frente de lavra. Após carregados, os caminhões são direcionados conforme o material a ser transportado: no caso de frentes de minério, o material é descarregado em um britador ou pilhas de estoque; o material proveniente de frentes de estéril é transportado e descarregado em pilhas de estéril (ARAÚJO, 2008).

Considerar a existência de uma pilha de ROM (*Run of Mine*); minério bruto; pode contribuir para a operação da usina de beneficiamento. Segundo Bley et al. (2012), sua importância é manter a capacidade produtiva da usina de beneficiamento e a homogeneização do material frente a uma falta de minério prolongada das frentes de lavra.

Diante do que foi exposto, este trabalho apresenta uma formulação matemática para resolução do problema de planejamento operacional da lavra, contemplando um britador, uma pilha de ROM, frota de equipamento de carga e frentes de lavra. As candidatas a frentes de lavra são provenientes de um modelo de blocos que são segregados conforme tipo de material, quantidade e composição química. A existência da pilha de ROM em um modelo de planejamento de curto prazo é um diferencial do modelo matemático apresentado.

Após a introdução, o artigo apresenta uma breve descrição de trabalhos relacionados às aplicações da Pesquisa Operacional (PO) na mineração, a seção 3 descreve o modelo matemático em programação linear inteira mista que geram soluções ótimas em cada período de planejamento; a seção 4 discute alguns resultados obtidos ao executar cenários propostos.

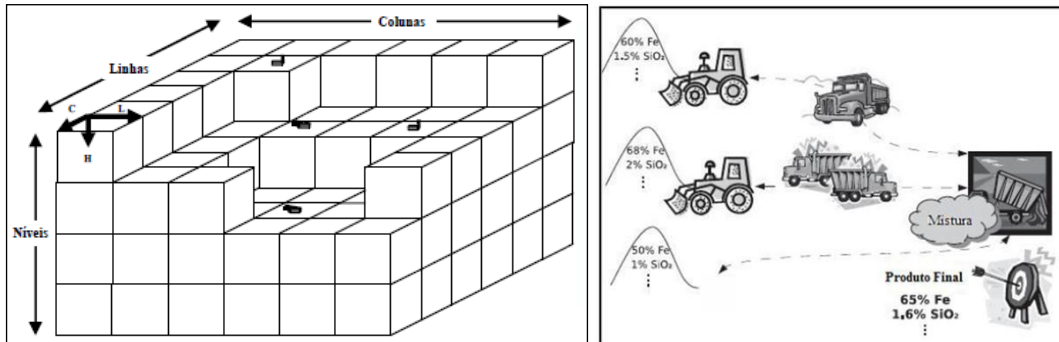
2. Revisão

A utilização de técnicas de Pesquisa Operacional vem sendo aplicada em minas a céu aberto desde 1965, quando Lerchs e Grossmann propuseram um algoritmo de programação dinâmica com o objetivo de projetar a cava ótima de uma mina, ou seja, definir os blocos cuja lavra maximiza o lucro, onde minério gera lucro ao ser processado e estéril não possui valor agregado (Newman et al., 2012). Segundo Amaral e Pinto (2009), a partir desse marco, foram desenvolvidos inúmeros algoritmos e modelos para esse e outros problemas tendo em comum a grande escala quando se consideram instâncias reais e são considerados NP-difíceis, o que torna a utilização de métodos exatos, resultar em tempo computacional inviáveis em alguns casos. Dentre eles os que mais relacionados à proposta desse trabalho são o sequenciamento de lavra e, sobretudo, o planejamento operacional de lavra.

Características dessas duas abordagens são apresentadas na

Figura 1. A figura à esquerda apresenta uma parte de um modelo de blocos desenvolvido após um estudo geostatístico, onde cada bloco possui um índice geral, posicionamento referente às

três coordenadas; linha, coluna e nível; e características físico-químicas individuais. A figura à direita representa de forma resumida o objetivo da blendagem a ser alcançado no curto prazo, onde frentes de lavras, sendo essas formadas por um ou mais blocos considerados disponíveis, entrarão operação quando um equipamento de carga for alocado às mesmas.



Fonte: Amaral e Pinto (2009).

Fonte: PANTUZA JÚNIOR, 2011.

a) Modelo de blocos

b) Planejamento operacional de Lavra

Figura 1-Representação das atividades de lavra em uma mina à céu aberto.

O sequenciamento de lavra consiste na determinação de avanços de escavação da mina em um horizonte de longo ou médio prazo garantindo a manutenção do ângulo de segurança de taludes. Diferentes modelos matemáticos foram propostos para geração do sequenciamento de lavra que definem, de forma geral, em qual período t cada bloco será extraído de forma a maximizar a lucratividade da extração, considerando os blocos contidos na cava ótima, capacidade de processamento e alguns casos a existência de uma ou mais pilha de ROM (CACCEITA et al, 2003). Newman et al., (2010) fizeram uma revisão da literatura abordando modelos relacionados ao planejamento estratégico e tático de minas a céu aberto e mina subterrânea. Segundo os autores, modelos de sequenciamento de lavra, ao contrário dos modelos de cava ótima que consideram apenas as restrições de precedência, consideram também em qual sequência extrair o bloco e capacidades operacionais como de carregamento e processamento. A direção apontada pelos autores nas pesquisas recentes é a maior atenção a detalhes, tornando as respostas dos modelos mais realísticas e aplicando-os a problemas maiores com tempo computacional aceitável e sem comprometer significativamente a resposta.

Segundo Bley et al. (2012), a formação de pilhas vem sendo desconsiderada em estudos sobre sequenciamento de lavra e sua importância para manter a capacidade produtiva da usina de beneficiamento e a homogeneização do material, os autores apontam que a consideração de mais de uma pilha de estoque aumenta consideravelmente a complexidade do problema.

O planejamento operacional de lavra é caracterizado por gerar uma solução atribuída ao horizonte de curto prazo e válida até que uma frente de lavra seja totalmente consumida ou aconteça outro evento que gere a necessidade de uma nova solução, os modelos matemáticos consideram em geral a programação por metas nas quais penalidades são atribuídas aos desvios de produção, desvios de qualidade da blendagem do minério e desvio em atender a relação estéril-minério (REM), alocando equipamentos de carga e transporte em locais na superfície da mina aptos a transformarem-se em uma frente de lavra ativa (COSTA, 2005). Trabalhos como Costa (2005), Souza et al. (2010) e Araújo e Souza (2010), Pantuza Júnior (2001) são alguns exemplos de autores abordam a modelagem matemática para o problema do planejamento operacional de lavra

Segundo Amaral e Pinto (2009) a clara divisão entre o sequenciamento de lavra e o

planejamento operacional de lavra dificulta a construção de modelos mais flexíveis, que possam apoiar decisões em mais de um horizonte de planejamento.

Amaral (2008) e Amaral e Pinto (2009) apresentam uma heurística híbrida que contém um modelo em programação inteira mista para geração de cada ordem de lavra onde objetiva-se a maximização da utilização dos recursos, por exemplo, diminuindo o deslocamento entre o ponto atual do equipamento de carga e o bloco a ser alocado.

3. Planejamento Operacional da Lavra com Alocação de Equipamentos de Carga e considerando Pilha de ROM

No sistema estudado nesse artigo, o ROM (*run-of-mine*), minério bruto, extraído pelos equipamentos de carga alocados a frentes de minério é enviado ao britador para ser reduzido. Após processado pelo britador, é possível o envio direto a uma usina de beneficiamento e caso a quantidade exceda a demanda da usina, a quantidade em excesso é enviada a uma pilha de ROM. A Figura 2 apresenta o processo descrito anteriormente.

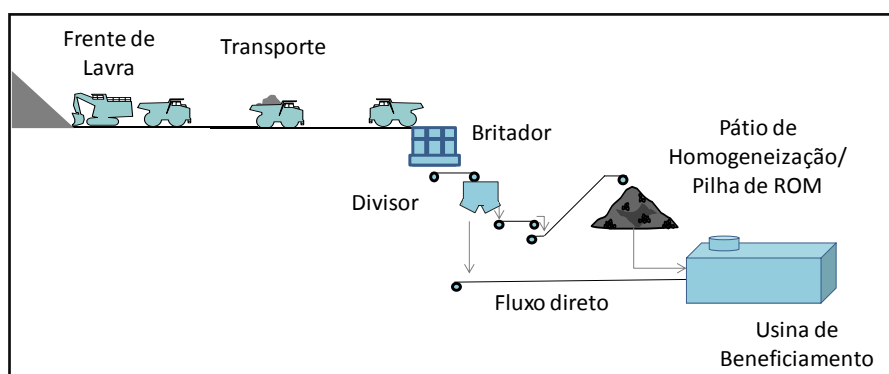


Figura 2-Representação da lavra de minério. Adaptado de Pimentel (2011).

Caso seja estéril, o material é direcionado a pilhas de estéril. A Figura 3 apresenta o carregamento e transporte do estéril.

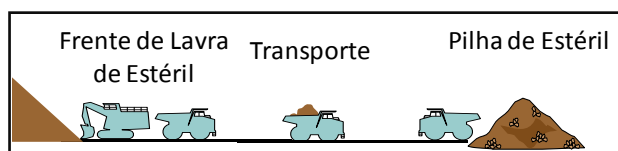


Figura 3-Representação da atividade da lavra de estéril

O modelo proposto nesse trabalho considera a existência de uma pilha de ROM que representa um estoque já processado pelo britador e pela inexistência da restrição de obedecer à relação estéril-minério cujo objetivo principal é evitar estrangulamento da cava, ou seja, evitar que apenas blocos de estéril estejam disponíveis por longos períodos de tempo. Permite-se a extração mais efetiva de ROM quando a pilha encontrar-se abaixo do nível de pedido, sua importância é suprir à demanda quando as frentes de lavra em operação não forem capazes de extrair ROM o suficiente. Com objetivo de evitar que a cava seja aprofundada bruscamente na busca por minério nesse artigo sugere-se que se penalize especialmente a descida de nível pelo equipamento de carga, permitindo que a lavra seja efetuada preferencialmente na bancada em que se encontra o recurso. Considera-se no sistema proposto que a capacidade dos equipamentos e recurso assim como a demanda da usina estão em acordo com a quantidade de minério e estéril a ser lavrado ao longo do tempo.

3.1. Modelo de alocação de equipamentos de carga

A seguir serão apresentados os parâmetros de entrada, variáveis de decisão e modelo matemático proposto.

Dados da Mina:

- B' : Conjunto de índices para os blocos disponíveis.
- R : Conjunto de coordenadas para representação do modelo de blocos.
- V : Conjunto das variáveis físico-químicas.
- p_{br} : Posição do bloco b em relação à coordenada r .
- T_{vb} : Teor da variável físico-química v no bloco b .
- s_b : $\begin{cases} 1 & \text{se o bloco } b \text{ é de minério.} \\ 0 & \text{se o bloco } b \text{ é de estéril.} \end{cases}$
- MP : Capacidade atribuída à pilha de ROM.
- $PercP$: Nível de pedido para reposição da pilha de ROM (% da capacidade).
- $VolP$: Tonelagem atual na pilha de ROM.
- Cr : Capacidade de retomada (t/h) do ROM contido na pilha.
- Cb : Capacidade de processamento do britador (t/h).

Conjunto de metas e requisitos:

- Dem : Demanda por ROM (t/h).
- Tr_v : Teor requerido na blendagem do ROM da variável físico-química v .
- Tu_v : Teor máximo na blendagem do ROM da variável físico-química v .
- Tl_v : Teor mínimo na blendagem do ROM da variável físico-química v .
- $NNLS$: Nível máximo de níveis da mina que podem ser lavrados simultaneamente.
- $dmax_r$: Deslocamento máximo permitido na coordenada r .
- DTA_v : Desvio de teor acumulado do teor v .

Dados dos Equipamentos de Carga:

- I : Conjunto dos equipamentos de carga disponíveis.
- po_r^i : Posição inicial do equipamento de carga i em relação à coordenada r .
- $Pmin_i$: Produção horária mínima para operação do equipamento de carga i .
- $Pmax_i$: Produção horária máxima para operação do equipamento de carga i .

Benefícios:

- BM : Peso atribuído à lavra de ROM.
- BS : Peso atribuído à lavra de estéril.

Penalidades:

- α_v^- : Penalidade por desvio inferior da físico-química v .
- α_v^+ : Penalidade por desvio superior da físico-química v .
- NZ : Penalidade por aprofundar a cava.
- γ_i : Penalidade pelo deslocamento do recurso i .

δ^- : Penalidade por desvio negativo em relação à demanda de ROM.

Variáveis de decisão:

P_b : Produção horária no bloco b (t/h).

D^- : Desvio negativo do ritmo de lavra total (t/h) em relação demanda de ROM.

D^+ : Desvio positivo do ritmo de lavra total (t/h) em relação a demanda de ROM.

DT^- : Desvio negativo do total extraído em relação demanda de ROM (t/h).

DT^+ : Desvio positivo do total extraído em relação demanda de ROM (t/h).

hN_i^- : Diferença negativa de nível entre a posição inicial do recurso i e o bloco b alocado.

hN_i^+ : Diferença positiva de nível entre a posição inicial do recurso i e o bloco b alocado.

RP : Quantidade de ROM consumida da pilha para suprir à demanda (t/h).

z : $\begin{cases} 1 - \text{se a pilha de ROM será consumida.} \\ 0 - \text{caso contrário.} \end{cases}$

w : $\begin{cases} 1 - \text{se será lavrado ROM excedendo à demanda.} \\ 0 - \text{caso contrário.} \end{cases}$

y_b^i : $\begin{cases} 1 - \text{se o recurso } i \text{ é alocado ao bloco } b. \\ 0 - \text{caso contrário.} \end{cases}$

d_r^i : Deslocamento realizado pelo recurso i .

$Nmin$: Número do menor nível com recurso alocado.

$Nmax$: Número do maior nível com recurso alocado.

dN : Diferença entre o maior e o menor nível com recurso alocado.

dT_v^- : Desvio negativo em relação ao teor recomendado da variável físico-química v .

dT_v^+ : Desvio positivo em relação ao teor recomendado da variável físico-química v .

A função objetivo (1) visa a maximizar a produção de ROM e estéril, cujos parâmetros de peso destinados ao ROM (BM) devem ser suficientemente superiores ao benefício atribuído à lavra de estéril (BS). São penalizados os deslocamentos realizados pelos equipamentos de carga para alcançarem os blocos de destino, os desvios de qualidade em relação aos teores requeridos, o déficit de produção de ROM em relação à demanda, o aprofundamento da cava e a ociosidade dos equipamentos de carga.

$$\begin{aligned} \max z' = & \sum_{b \in B'} P_b \times BM \times s_b + \sum_{b \in B'} P_b \times BS \times (1 - s_b) - \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} d_r^i \times \gamma_i - \sum_{v \in V} (\alpha^+ \times dT_v^+ + \alpha^- \times dT_v^-) - \\ & - DT^- \times \delta^- - \sum_{i \in I} hN_i^+ \times NZ \end{aligned} \quad (1)$$

A restrição (2)-(4) definem-se os desvios de qualidades em relação à meta, restringindo a mistura por meio de faixas aceitáveis de qualidade, tal faixa mostra-se necessária pois desvios acentuados em relação à meta de qualidade podem prejudicar o processo de beneficiamento do ROM.

$$\sum_{b \in B'} ((T_{vb} - Tr_v) \times P_b \times s_b) + (TP_v - Tr_v) \times RP + DTA_v + dT_v^- - dT_v^+ = 0 \quad \forall v \in V \quad (2)$$

$$\sum_{b \in B'} ((T_{vb} - Tl_v) \times P_b \times s_b) + (TP_v - Tl_v) \times RP + DTA_v \geq 0 \quad \forall v \in V \quad (3)$$

$$\sum_{b \in B'} ((T_{vb} - Tu_v) \times P_b \times s_b) + (TP_v - Tu_v) \times RP + DTA_v \leq 0 \quad \forall v \in V \quad (4)$$

As restrições (5)-(6) definem que cada equipamento de carga de estar alocado a um bloco.

$$\sum y_b^i = 1 \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum y_b^i \leq 1 \quad \forall b \in B' \quad (6)$$

Em (7)-(8) limita-se a produção de cada equipamento de carga entre uma faixa de operação (t/h) e define-se que cada equipamento de carga irá operar somente no bloco alocado por ele.

$$\sum_{i \in I} y_b^i \times Pmin_i - P_b \leq 0 \quad \forall b \in B' \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} y_b^i \times Pmax_i - P_b \geq 0 \quad \forall b \in B' \quad (8)$$

Na equação (9) é atribuído o desvio de quantidade da produção de ROM em relação à demanda, na equação seguinte estipula-se o desvio de produção em um cenário onde a retomada da pilha de ROM pode ser necessária com intuito de suprir à demanda de ROM. A restrição (11) permite que a produção total de ROM exceda à demanda apenas se a pilha de ROM esteja com material abaixo do nível de pedido. Em (12) é utilizado "M Grande" para atribuir uma produção igual ou superior à demanda na restrição seguinte permite-se a retomada de ROM em um cenário onde a produção total de ROM não atende à demanda. Em (13-14) utiliza-se uma restrição disjuntiva onde ou a produção total de ROM excede/igual a demanda ou permite-se o uso do material contido na pilha de ROM para suprir à demanda.

$$\sum_{b \in B'} (P_b \times s_b) - DEM + D^- - D^+ = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{b \in B'} (P_b \times s_b) + RP - DEM + DT^- - DT^+ = 0 \quad (10)$$

$$w \times VolP - MP \times PercP \leq 0 \quad (11)$$

$$w \times M - D^+ \geq 0 \quad (12)$$

$$RP - z \times M \leq 0 \quad (13)$$

$$RP - D^- \leq 0 \quad (14)$$

As restrições (15)-(16) limitam a quantidade de ROM retomada da pilha (t/h) e a quantidade de ROM proveniente das frentes de lavra a serem processadas pelo britador.

$$RP - Cr \leq 0 \quad (15)$$

$$\sum_{b \in B'} (P_b \times s_b) \leq Cb \quad (16)$$

No conjunto de restrições (17) a (22) seguem conforme o modelo matemático apresentado em Amaral (2008) onde computam-se os deslocamentos realizados pelos equipamentos de carga.

$$Nmin \leq \sum_{b \in B} y_b^i \times p_{br} \quad \forall i \in I, r = N \quad (17)$$

$$Nmax \geq \sum_{b \in B} y_b^i \times p_{br} \quad \forall i \in I, r = N \quad (18)$$

$$dN = Nmax - Nmin \quad (19)$$

$$dN \leq NNLS \quad (20)$$

$$d_i^r = \left| \sum_{b \in B'} p_{br} \times y_b^i - po_r^i \right| \quad \forall i \in I, r \in R \quad (21)$$

$$d_i^r \leq d \max_r \quad \forall i \in I, r \in R \quad (22)$$

Na restrição 23 registram-se o aprofundamento de cada equipamento de carga, onde nesse artigo, considera-se o nível zero como o mais alto entre os blocos. Dessa forma hN_i^+ o número de níveis aprofundados pelo recurso.

$$\sum_{b \in B'} (y_b^i \times p_b^r) - po_r^i + hN_i^- - hN_i^+ = 0 \quad \forall i \in I, r = Nível \quad (23)$$

No conjunto de restrições (24)-(25) são estabelecidos os domínios para as variáveis, sendo binárias as variáveis de alocação dos equipamentos de carga, z e w , as demais variáveis de decisão são não-negativas.

$$y_b^i \in \{0,1\} \quad \forall b \in B', i \in I \quad (24)$$

$$z, w \in \{0,1\} \quad (25)$$

4. Testes Computacionais

Os experimentos foram realizados em um computador Core i5 2.40 GHz, 8 GB RAM, com Windows 7 Professional 2009. Para a resolução do modelo (1) – (25) utilizou-se o *software* de otimização CPLEX 12.51. O compilador Visual Studio C++ 2012 foi usado para a implementação do modelo que executa as bibliotecas do CPLEX para resolver o modelo matemático.

Para validação do modelo matemático proposto, foi implementada uma instância com 100 blocos disponíveis para lavra, cada um possui localização geográfica distinta, tipo de material e características químicas, Fe e SiO₂. As porcentagens mínimas, requidadaos e máximas são Fe [50; 52.2; 56] e SiO₂ [11; 14,9; 17]. Foram considerados 6 equipamentos de carga com os seguintes limites de produção: A [300; 800], B [375; 1000], C [375; 1.000], D [225; 600], E [225; 600] e F [300,800] t/h. Localizados de forma uniforme pela mina. A pilha de ROM possui uma capacidade 60000 toneladas e um nível de pedido de 30%, ou seja, caso a pilha esteja abaixo de 18000 toneladas, será permitida uma lavra mais efetiva de ROM capaz de ultrapassar à demanda da usina, 2400 t/h.

A Tabela 1 apresenta resultados computacionais simplificados de 3 cenários onde alterou-se a capacidade do britador e tamanho atual da pilha de ROM. Apresentam-se como resultados a extração horária total de estéril e minério, se a demanda da usina será suprida e o deslocamento total, onde cada unidade representa um bloco percorrido. A tabela demonstra o tempo computacional requerido para gerar a solução ótima.

Item	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Capacidade do Britador (t/h)	4000	4000	2000
Tamanho Atual da Pilha(t)	10000	30000	30000
RESULTADOS			
Produção de ROM(t/h)	4000	2400	2000
Produção de Estéril(t/h)	800	2400	2800
Consumo da Usina(t/h)	2400	2400	2400
Deslocamento Total(unid)	1	1	3
Tempo Computacional(seg)	0,2028	0.1248	0.2964

Tabela 1-Resultados Gerais

No Cenário 1 a produção de ROM foi igualada à capacidade do britador pois a pilha de ROM estava abaixo do nível de pedido e haviam blocos disponíveis para lavra intensificada de ROM.

No Cenário 2 foi considerado que a pilha de ROM possuía material o suficiente, por isso, a produção foi limitada à 2400 t/h, igual à demanda da usina de beneficiamento e o restante da produção foi direcionada para extrair estéril.

No último cenário, com intuito de estudar a retomada da pilha, limitou-se a capacidade do britador em 2000 t/h, sendo necessária uma retomada de ROM de 400 t/h para suprir a falta de ROM à usina, o restante da capacidade produção, 2800 t/h, foi direcionada à produção de estéril.

Nota-se que em uma situação real, a aplicação dos resultados propostos pelo planejamento, tem duração de tempo limitada. Situações como atingir a capacidade da pilha de ROM, consumir todo seu ROM podem acontecer com o passar do tempo. Outra situação possível é o fim do bloco alocado. Essas situações requisitariam um novo planejamento a fim de adequar a operação à nova realidade.

5. Conclusão

Foi apresentado um modelo matemático em programação linear inteira mista para o problema denominado como planejamento operacional de lavra com alocação de equipamentos de carga e considerando uma pilha de ROM. O modelo foi testado com uma instância realística elaborada pelos autores e os resultados obtidos foram coerentes, apresentando baixo tempo computacional para resolução do problema.

Na direção de um trabalho futuro, sugere-se a implementação de um sistema com retroalimentação de dados atualizando a cada iteração: a eliminação de blocos lavrados e o tamanho da pilha, com objetivo de estender a abrangência do planejamento de curto prazo.

Referência

- AMARAL., M. *Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto*. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Minas Gerais, 108 p., 2008.
- AMARAL, M. e PINTO, L. R. *Planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto com alocação de equipamentos de carga*, Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, p.907-918, 2009.
- ARAÚJO, F., C., R.; SOUZA, M., J., F. Uma heurística para o planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões. *Revista Escola de Minas*, v.64, n.1, p.69-76, 2011.
- BLEY, ANDREAS et al. *Solving mixed integer nonlinear programming problems for mine production planning with stockpiling*. 2012.

CACCETA, L.; HILL, S. P. An Application of Branch and Cut to Open Pit Mine Scheduling. *Journal of Global Optimization*, v.27, p.349-365. 2003.

CHICOISNE, R.; ESPINOZA, E.; GOYCOOLEA, M; MORENO, E; RUBIO, E. A new algorithm for the open pit mine production scheduling problem. *Operations Research*, v. 60, n.3, p.517-528, 2012.

COSTA, F. P. *Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto..* 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

HOCHBAUM, D. S.; CHEN, A. Performance analysis and best implementations of old and new algorithms for the open pit mine problem. *Operations Research*, v. 48, n 6, p. 894-914, 2000.

KOZAN, E.; LIU, S., Q. An Interactive Planning and Scheduling Framework for Optimizing Pits-to-Crushers Operations. *Industrial Engineering & Management Systems*, v.11, n.1, p. 94-102, 2012.

NEWMAN, A.; RUBIO, E.; CARO, R.; WEINTRAUB, A.; EUREK, K. A Review of Operations Research in Mine Planning. *Interfaces*, n.3, v. 40, p. 222 -245, 2010.

PANTUZA JÚNIOR, G. *Métodos de otimização multiobjetivo e de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto.* 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto. 2011.

PINEDO, M. L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems.* 3.ed. New York: Springer, 2008.

SOUZA, M. J. F.; COELHO, I. M.; RIBAS, S.; SANTOS, H. G. MERSCHMANN, L. H. C. A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, 207, p.1041-1051, 2010.

RAMAZAN, S. Then new fundamental Tree Algorithm for production scheduling of open pit mines. *In: European Journal of Operational Research*, v.177, p.1153-1166, 2006.