LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Limeira–SP, 02 a 06 de setembro de 2019

Uma formulação matemática para o problema de blendagem de pilhas intermediárias em uma mina de níquel

Arlem Silva[1], Ênio Lopes Júnior[2], Luciano Perdigão Cota[2], Thiago Antonio Melo Euzébio[2], Marcone Jamilson Freitas Souza[3]

[1]Especialização em Beneficiamento Mineral,
Instituto Tecnológico Vale,
CEP 35.400-000, Ouro Preto (MG), Brasil

[2]Instituto Tecnológico Vale,
CEP 35.400-000, Ouro Preto (MG), Brasil

[3]Departamento de Computação – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP),
CEP 35.400-000, Ouro Preto (MG), Brasil

arlem.silva@vale.com, enio.lopes@itv.org, luciano.p.cota@itv.org,
thiago.euzebio@itv.org, marcone@ufop.edu.br

RESUMO

Este trabalho trata de um problema de blendagem de pilhas intermediárias em uma mina de níquel. Aplicações de blendagem de minério são amplamente tratados na literatura, mas devido a especificidade das operações em uma mina de níquel, o problema deste estudo não foi encontrado. Nas minas de níquel é realizada estocagem em pilhas intermediárias de todo o minério extraído das frentes de lavra. O problema tratado envolve atender as solicitações de materiais da usina buscando minimizar três objetivos, sendo eles, desvios das metas de produção, desvios das metas de qualidade e minimização do número de pilhas. Para avaliar a formulação matemática foram utilizados estudos de caso reais de uma mina de níquel brasileira e os resultados foram comparados aos gerados por uma equipe de planejamento. Os resultados mostraram a eficiência da formulação matemática e sua aplicabilidade prática como ferramenta de apoio à tomada de decisão.

PALAVRAS CHAVE. Programação Linear Inteira Mista, Blendagem, Pilhas, Níquel.

Tópicos: PO na Indústria.

ABSTRACT

This work deals with a problem of intermediate piles blending in a nickel mine. In the literature are found many ore blending applications, but because of the specificity of operations at a nickel mine, the problem of this study wasn't. In the nickel mines, there is a stage of storage in intermediate piles of all the ore extracted from the mining fronts. The problem addressed involves meeting the requests of materials from the plant seeking to minimize three objectives: deviations from the production targets, deviations from the quality targets and minimization of the number of piles. The mathematical formulation is evaluated using real case studies of a Brazilian nickel mine. The results were compared to those generated by a planning team. The results showed the efficiency of the mathematical formulation and its practical applicability as a tool to support decision making.

KEYWORDS. Mixed Integer Linear Programming, Blending, Piles, Nickel.

Paper topics: OR in Industry.

https://proceedings.science/p/106877?lang=en

1. Introdução

O níquel é um dos metais mais versáteis e importantes do mundo. O mercado global consome cerca de 2 milhões de toneladas de níquel por ano [Farrokhpay et al., 2018]. Algumas características importantes deste tipo de metal são: i) duro e maleável; ii) resistente à corrosão; e iii) quando submetido a temperaturas extremas mantém suas propriedades físicas e mecânicas. Devido a essas características, existem inúmeras aplicações para o uso de níquel, como aço inoxidável, cunhagem de moedas e baterias recarregáveis.

O sulfeto e a laterita são os dois tipos de minério do qual o níquel pode ser extraído. Cerca de 70% do níquel do mundo ocorre como laterita, mas este minério tem alto custo de tratamento devido a complexidade do seu processo de beneficiamento e o baixo teor. Já o minério de sulfeto de níquel que possui menor custo de tratamento tem diminuído substancialmente, por isso, existe uma busca por aprimoramento na exploração do minério de laterita de níquel [Farrokhpay et al., 2018; Xu et al., 2013]. O estudo deste artigo tem o seu foco em minas de níquel laterítico. As minas deste tipo são encontrados em países como Brasil, Indonésia, Canadá e Nova Caledônia.

A etapa de blendagem (ou mistura) tem grande importância no processo de tratamento de minério. Essa etapa consiste na determinação de quanto minério proveniente de um conjunto de pilhas ou frentes deve ser misturado de modo a gerar um material requisitado. O teor dos parâmetros de controle é usado para caracterizar o produto, como percentagem de ferro, sílica, níquel, cobalto e manganês.

Nas minas de níquel existe uma operação intermediária entre a extração do minério nas frentes de lavra e o beneficiamento nas usinas. Esta operação consiste em subdividir o minério extraído das frentes em pilhas armazenadas nos pátios, chamadas pilhas intermediárias. Cada pilha possui materiais com uma classificação de teores de parâmetros de controle específica, definidos por testes químicos. Na Figura 1 são mostradas algumas pilhas intermediárias de uma mina de níquel do Brasil.



Figura 1: Pilhas intermediárias de uma mina de níquel.

Os materiais armazenados nas pilhas intermediárias são utilizados para alimentar a usina

que irá produzir os produtos a serem entregues aos clientes. As usinas utilizam planejamentos semanais e/ou diários de produção. Para atender cada planejamento são retirados materiais das pilhas intermediárias de acordo com a especificação dos teores de controle e a quantidade de massa necessária. Estas especificações são ajustadas de acordo com as demandas dos clientes, limitação técnica dos equipamentos da usina e material disponível nas pilhas.

Até o presente momento, na mina objeto de estudo deste trabalho, o planejamento de mistura das pilhas intermediárias é realizado por um grupo de engenheiros e geólogos usando estratégias intuitivas e cálculos em planilhas digitais. Este grupo de colaboradores necessitam de várias horas para encontrar uma solução factível para o problema e não existe garantia que a solução encontrada otimiza de fato os objetivos do problema.

Uma formulação de programação matemática linear inteira mista por metas é proposta para resolver o problema de maneira ótima. Os principais objetivos neste problema são a minimização dos desvios da meta de produção, minimização dos desvios de teores de qualidade e minimização do número de pilhas utilizadas. Existe um custo relevante de operação com caminhões e equipamentos de carga para a remoção de materiais, por isso, um dos objetivos envolve a utilização do número mínimo de pilhas.

Na literatura são encontrados diversos trabalhos que tratam de problemas de mistura de minério em frentes de lavra e em minas de carvão. Como o trabalho de Chanda e Dagdelen [1995], que em 1995 já tratava de um problema de mistura de minérios em frentes de lavra. Os trabalhos da literatura embasam a justificativa de utilizar uma abordagem científica de otimização para a resolução do problema de mistura em pilhas intermediárias em uma mina de níquel. Problemas dessa natureza, em versões de grande porte, são extremamente complexos de serem resolvidos de maneira eficiente usando estratégias intuitivas.

Para realizar os experimentos com a formulação matemática proposta são utilizados cenários reais da mina de Onça Puma da empresa Vale S.A., localizada na cidade de Ourilândia/PA no Brasil. A mina iniciou a produção no ano de 2008 e está construída sobre uma jazida de níquel laterítico com capacidade nominal de produção de 53.000 toneladas métricas por ano de níquel contido em ferro-níquel. O investimento total de Onça Puma foi estimado em US$ 2,841 bilhões.

As demais seções do artigo seguem organizadas como a seguir. Na seção 2 é a apresentado o problema tratado e o funcionamento básico de uma mina de níquel. A revisão bibliográfica é tratada na seção 3. Na seção 4 é apresentada a formulação matemática proposta. Os experimentos realizados com a implementação da formulação matemática e os cenários reais da mina brasileira são descritos na seção 5. Finalmente, na seção 6 são tratadas as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2. Caracterização do Problema

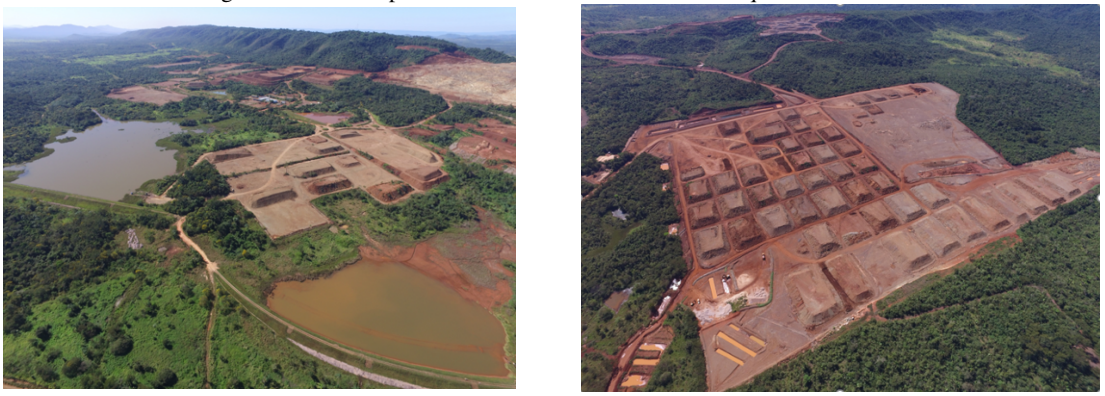
Basicamente, a operação de uma mina de níquel laterítico pode ser dividida em 5 etapas: 1) Extração do minério nas frentes de lavra; 2) Armazenamento do minério em pilhas de estocagem; 3) Envio do minério blendado para a usina; 4) Beneficiamento do minério na usina e geração do produto final; e 5) Transporte do produto final até os clientes. As etapas 2 e 3 não são obrigatórias em minas de minério de ferro, nessas minas o minério é enviado direto das frentes de lavra para as usinas ou pilhas de estéril. Como o níquel é um bem mineral muito seletivo, 100% do minério lavrado nas frentes deve ser estocado em pilhas intermediárias, para depois, seguindo um plano de retomada, ser transportado para a unidade de beneficiamento.

Existe um alto custo envolvido na construção e operação dos pátios de pilhas de estocagem (etapas 2 e 3). Para operá-los são necessários diversas atividades, como construção de diques de contenção de sedimentos, licenças de supressão vegetal, decapeamento de grande áreas, terrapla-

nagem, sistemas de drenagem dos pátios e análise química do material das pilhas para estabelecer o teor dos parâmetros de controle. A analise química tem grande importância na mineração, dado que a classificação dos materiais impacta diretamente em diversos fatores, como eficiência da usina de beneficiamento, quantidade de insumos utilizados e preço do produto final [Júnior et al., 2018].

Na Figura 2 são ilustrados dois pátios de pilhas intermediárias de uma mina de níquel do Brasil. Pode-se observar que os pátios possuem grande capacidade de estocagem de pilhas e existe uma distância considerável entre as pilhas. Na mina de níquel de Onça Puma os pátios de pilhas ocupam uma área de 1,932 km^2.

Figura 2: Pátios de pilhas de minério em uma mina de níquel do Brasil.



Este trabalho trata especificamente da blendagem das pilhas intermediárias. Neste processo, a usina requisita uma mistura de materiais provenientes das pilhas que respeite uma especificação de parâmetros de controle. Esta especificação visa atender um conjunto de restrições, como limitações técnicas dos equipamentos da usina e solicitações dos clientes. Por exemplo, para operação adequada dos fornos é necessário que o material respeite limites máximos e mínimos de ferro e de sílica por magnésio. O cliente que irá utilizar o níquel para o desenvolvimento de aço inoxidável, por exemplo, deseja um produto com menor concentração de cobalto, porque este parâmetro em níveis altos prejudica a produção.

3. Revisão Bibliográfica

O problema mistura de minérios é amplamente tratado na literatura, existem trabalhos publicados desde a década de 80, como o de White e Olson [1986], em que é proposto um modelo de programação linear para despacho em minas de minério, este modelo é embarcado em sistemas de várias minas do mundo. Grande parte dos trabalhos da literatura tratam de aplicações em minas de ferro e de carvão.

Alguns trabalhos de aplicações em minas de ferro são descritos a seguir. Em Mershmann [2002] é proposto um sistema, chamado OTISIMIN, para resolver um problema de planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica dos caminhões que realizam o transporte. A função objetivo neste problema é maximizar o ritmo de lavra. As metas de qualidade e produção não são consideradas. Em Costa et al. [2005] foram realizados aprimoramentos nos modelos matemáticos usados no OTISIMIN. Metas de produção e qualidade também foram incluídos. Em Fioroni et al. [2008] é proposto um modelo de simulação de eventos discreto que interage com um modelo de otimização para a resolução de um problema de planejamento mensal de lavra. Um outro problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto é abordado em Souza et al. [2010]. Os autores consideram que os equipamentos de carga e os caminhões têm diferentes capacidades e

https://proceedings.science/p/106877?lang=en

produtividade. Para resolver o problema foram propostos um modelo matemático e um algoritmo heurístico baseado no método *General Variable Neighborhood Search* (GVNS). Em Martins [2013] são propostos um modelo matemático de programação inteira mista e um de simulação para validar os resultados gerados pela otimização. O problema tratado também é de planejamento operacional de lavra em um mina de ferro, e são consideradas alocações de caminhões e equipamentos de carga. Em Silva et al. [2014] é tratado um problema de planejamento operacional de lavra onde é permitido extrair mais de um tipo de material de uma mesma frente de lavra. Para sua resolução é proposto um algoritmo heurístico baseado nos métodos *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures* (GRASP) e *Late Acceptance Hill-Climbing* (LAHC). Um problema de planejamento operacional de lavra com incertezas é tratado em Upadhyay e Nasab [2018]. Nessa abordagem é considerada a limitação existente nas previsões de uma mina a céu aberto, devido a complexidade das operações e dinamicidade do processo.

A seguir, são descritos trabalhos da literatura que tratam problemas de mistura de minério em minas de carvão. Chanda e Dagdelen [1995] propuseram um modelo de programação linear por metas para resolver um problema de mistura de minérios. Este trabalho é amplamente citado na literatura e algumas estratégias do modelo matemático ainda são utilizadas em diversas aplicações. Um problema de mistura de carvão analisando as emissões de enxofre é examinado em Shih e Frey [1995]. Nesse trabalho é proposto um modelo de otimização com quatro objetivos de minimização: i) custos esperados; ii) desvios dos custos; iv) emissão de enxofre; e iv) desvios na emissão de enxofre. Em Xi-jin et al. [2009] é proposto um método heurístico que combina os métodos *Simulated Annealing* e Algoritmo Genético para otimizar os parâmetros de mistura de carvão. Em Yin et al. [2018] é proposto um algoritmo híbrido que combina *Machine Learning* com um algoritmo genético para tratar o teor de cinzas e o valor calorífico. Um problema de planejamento de mistura em pátios de carvão é tratado em Das e Ragunathan [2015]. Nesse problema são analisados até 20 parâmetros de controle da qualidade, como valor calorífico, teor de cinzas e teor de umidade. Muitos dos parâmetros utilizados na mistura não seguem a regra de mistura média ponderada, por isso, é proposto um modelo de programação linear inteira mista.

A proposta deste trabalho se difere dos demais da literatura tanto no problema analisado quanto no modelo matemático proposto. O problema de planejamento de mistura em pátios de minas de níquel não foi encontrado na literatura. Este problema tem algumas características particulares quando comparado aos encontrados em minas de ferro e carvão, como armazenamento dos materiais em pilhas de estocagem e os altos custos envolvidos na construção e operação dessas pilhas. O modelo matemático proposto é de programação linear inteira mista por metas e busca minimizar três objetivos por soma ponderada.

4. Formulação matemática proposta

Nesta seção é apresentada a formulação de programação linear inteira mista por metas proposta para o problema de blendagem de pilhas intermediárias em uma mina de níquel. Esta formulação possui três objetivos de minimização, sendo eles: i) Desvio da produção em relação a meta de produção estabelecida; ii) Desvio de qualidade dos parâmetros de controle na mistura; e iii) Número de pilhas intermediárias utilizadas. Os objetivos e restrições que tratam das metas de produção e qualidade foram inspirados nos trabalhos de Souza e Toffolo [2018] e Souza et al. [2010].

4.1. Conjuntos, parâmetros e variáveis

Os conjuntos, parâmetros e variáveis usadas na formulação são descritos a seguir.

- Conjuntos:

https://proceedings.science/p/106877?lang=en

- M: Conjunto de pilhas intermediárias;
- Q: Conjunto dos parâmetros de qualidade.

- Parâmetros:
  - Pr: Massa total recomendada (ton);
  - Pl: Massa total mínima (ton);
  - Pu: Massa total máxima (ton);
  - α^-: Penalidade por desvio negativo da produção;
  - α^+: Penalidade por desvio positivo da produção;
  - t_{ij}: Teor do parâmetro j na pilha i (%);
  - tr_j: Teor recomendado para o parâmetro j (%);
  - tl_j: Teor mínimo admissível para o parâmetro j (%);
  - tu_j: Teor máximo admissível para o parâmetro j (%);
  - β_j^-: Penalidade por desvio negativo em relação ao valor recomendado para o parâmetro j;
  - β_j^+: Penalidade por desvio positivo em relação ao valor recomendado para o parâmetro j;
  - Qu_i: Massa disponível em cada pilha i (ton);
  - $transpmin_i$: Massa mínima que pode ser removida de cada pilha i (ton);
  - pp: Penalidade por uso de pilhas.

- Variáveis auxiliares e de decisão:
  - x_i: Massa a ser retirada da pilha i (ton);
  - y_i: Variável binária que indica se a pilha i será utilizada;
  - dm_j^+: Desvio positivo em relação ao recomendado do parâmetro j na mistura (ton);
  - dm_j^-: Desvio negativo em relação ao recomendado do parâmetro j na mistura (ton);
  - dp^-: Desvio negativo da massa total a ser retirada em relação ao recomendado (ton);
  - dp^+: Desvio positivo da massa total a ser retirada em relação ao recomendado (ton).

4.2. Modelo matemático

O modelo matemático do problema é apresentado pelas equações (1) a (14).

$$\min(\alpha^- dp^- + \alpha^+ dp^+) + \sum_{j \in Q}(\beta_j^- dm_j^- + \beta_j^+ dm_j^+) + \sum_{i \in M}(pp \times y_i) \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i \in M}(t_{ij} - tu_j)x_i \leq 0 \quad \forall j \in Q \tag{2}$$

$$\sum_{i \in M}(t_{ij} - tl_j)x_i \geq 0 \quad \forall j \in Q \tag{3}$$

$$\sum_{i \in M}(t_{ij} - tr_j)x_i + dm_j^- - dm_j^+ = 0 \quad \forall j \in Q \tag{4}$$

$$\sum_{i \in M} x_i \leq Pu \tag{5}$$

$$\sum_{i \in M} x_i \geq Pl \tag{6}$$

$$\sum_{i \in M} x_i - Pr + dp^- - dp^+ = 0 \tag{7}$$

$$x_i - Qu_i \leq 0 \quad \forall i \in M \tag{8}$$

$$\frac{x_i}{Qu_i} \leq y_i \quad \forall i \in M \tag{9}$$

$$y_i \times transpmin_i \leq x_i \quad \forall i \in M \tag{10}$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in M \tag{11}$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in M \tag{12}$$

$$dm_j^+, dm_j^- \geq 0 \quad \forall j \in Q \tag{13}$$

$$dp^+, dp^- \geq 0 \tag{14}$$

A função objetivo do problema é descrita pela (1) e pode ser dividida em três partes. Na primeira parte busca-se minimizar os desvios da produção em relação a meta estabelecida. Os parâmetros α^- e α^+ representam os pesos dados a uma produção abaixo e acima da meta, respectivamente. A minimização dos desvios de qualidade dos parâmetros de controle na mistura é tratada na segunda parte da função objetivo. Os parâmetros β_j^- e β_j^+ são os pesos dados a um desvio abaixo e acima da meta, respectivamente. A terceira parte da função objetivo busca minimizar o número de pilhas utilizadas. Há um alto custo envolvido na criação e operação de pilhas nos pátios, por isso, esse objetivo implica em melhor utilização das pilhas.

As restrições (2) e (3) garantem que os limites máximos e mínimos dos parâmetros de controle sejam respeitados. Pelo conjunto de restrições (4) objetiva-se alcançar a meta de teor dos parâmetros de controle. As restrições (5) e (6) garantem que a massa total removida respeite os limites máximo e mínimo, respectivamente. A restrição (7) define os desvios em relação a massa total recomendada.

A massa total a ser extraída em cada pilha intermediária não pode superar a quantidade de material disponível na pilha, isso é assegurado pelas restrições (8). As restrições (9) definem quais pilhas estão ativas. As restrições (10) garantem que uma quantidade de massa mínima deve ser removida de uma pilha. Em aplicações práticas não é viável economicamente remover pouca massa de uma pilha intermediária.

O domínio das variáveis do modelo são definidos nas restrições (11), (12), (13) e (14).

4.3. A complexidade do modelo

Nesta subseção é realizada a análise de complexidade do número de variáveis e do conjunto de restrições do modelo matemático. As variáveis do problema são x_i, y_i, dm_j^+, dm_j^-, dp^- e

https://proceedings.science/p/106877?lang=en

dp^+. Assim, a complexidade em termos de M e Q do número de variáveis é dada por $2M+2Q+2$.

Para analisar a complexidade do conjunto de restrições são analisadas as Eq. (2) a (14). Essa complexidade também é analisada em termos de M e Q. Então, a complexidade do conjunto de restrições é dada por $4Q + 5M + 4$.

5. Estudos de caso reais em uma mina de níquel

A formulação matemática foi implementada utilizando o resolvedor LINGO, versão 10.0, da Lindo Systems Inc. Os experimentos foram realizados em um computador Dell Inspiron 15-5557, com processador Core i7-6500U, 16 GB de RAM e sistema operacional Windows 10 de 64 bits. Para avaliar o modelo matemático foram utilizados dados reais da mina de níquel de Onça Puma da Vale S.A., localizada em Ourilândia do Norte/PA, onde o problema foi inicialmente identificado.

5.1. Geração dos parâmetros do modelo

Duas instâncias reais foram utilizadas para avaliar o modelo matemático, uma com 31 pilhas intermediárias e outra com 200 pilhas intermediárias. Na especificação são analisados 10 teores de qualidade: i) Ni - Níquel; ii) Co - Cobalto iii) Fe - Ferro; iv) SiO_2 - Sílica; v) MgO - Magnésio vi) Cr_2O_3 - Óxido de Cromo; vii) Al_2O_3 - Óxido de Alumina; $viii$) Ni/Co - Níquel por Cobalto; ix) SiO_2/MgO - Sílica por Magnésio; e x) Fe/Ni - Ferro por Níquel. Os valores dos teores foram normalizados porque eles possuem grandezas diferentes.

Na Tabela 1 são descritos os pesos utilizados na função objetivo.

Tabela 1: Pesos utilizados na formulação matemática.

Parâmetro	Peso	Critério
β_{Co} - β_{SiO_2} - β_{MgO}	0	Irrelevante
pp	5	Importante
$\beta_{Cr_2O_3}$ - $\beta_{Al_2O_3}$ - $\beta_{Ni/Co}$ - $\beta_{Fe/Ni}$	10	Muito Importante
β_{Fe} - β_{Ni} - $\beta_{SiO_2/MgO}$ - α^- - α^+	100	Crítico

Os pesos foram definidos de acordo com a criticidade dos itens. Os teores de qualidade de cobalto, sílica e magnésio isolados são irrelevantes para a usina. Por outro lado, teores como ferro, níquel e sílica por magnésio são de extrema importância, assim como, as metas de produção (α^+ e α^-). Os demais teores de qualidade possuem a criticidade muito importante e, por fim, a penalidade por uso de pilhas (pp) é considerado importante.

5.2. Experimentos e resultados

Na Tabela 2 são apresentados os resultados para instância 1 que possui 31 pilhas intermediárias e meta de produção de 43.000 toneladas. As quatro primeiras colunas apresentam a especificação requisitada pela usina. Os resultados encontrados pela equipe de planejamento da mina e do modelo matemático são mostrados nas duas últimas colunas. É importante destacar que a equipe de planejamento necessita de horas ou até dias para gerar este planejamento utilizando apenas planilhas eletrônicas.

As células identificadas com o caractere x indicam que essas informações não são requisitadas pela usina. Para estes teores foram utilizados valores sintéticos. Pode-se observar que o modelo matemático encontrou uma solução ótima de maneira instantânea e atingiu as metas de produção e teores de qualidade. Principalmente para os teores de maior importância, como ferro, níquel e sílica por magnésio. Além disso, utilizou um número de pilhas menor que a equipe de planejamento da usina.

https://proceedings.science/p/106877?lang=en

Tabela 2: Resultados para a instância 1 com 31 pilhas intermediárias e solicitação de 43.000 toneladas de produção.

Especificação				**Resultados**	
Parâmetros de Qualidade	Teor Máximo (%)	Teor Mínimo (%)	Teor recomendado (%)	Equipe de Planejamento (%)	Modelo Matemático (%)
Ni	1,55	1,3	1,48	1,48	1,48
Co	x	x	x	0,06	0,06
Fe	16,5	x	11,57	11,57	11,57
SiO2	x	x	x	42,51	42,49
MgO	x	x	x	24,55	25,00
Cr2O3	3	x	1,75	1,75	1,75
Al2O3	4	x	1,11	1,11	1,11
Ni/Co	x	24	24,47	24,47	24,32
SiO2/MgO	1,75	1,6	1,73	1,73	1,73
Fe/Ni	10	5	7,83	7,83	7,81
Produção (ton)				43.313	43.000
Número de Pilhas Utilizadas				6	5
Tempo de Execução (seg)				-	1

Na Tabela 3 são mostrados os resultados para a instância 2, com 200 pilhas intermediárias. Para essa instância não existe uma solução encontrada pela equipe de planejamento da mina. Neste cenário foram analisadas três metas de produção: i) 70.000 ton; ii) 150.000 ton; e iii) 300.000 ton. Também foram analisados os resultados do modelo matemático sem a FO3, que minimiza o número de pilhas utilizadas. As quatro primeiros colunas apresentam a especificação requisitada pela usina e nas seis últimas colunas são apresentados os resultados.

As células identificadas por x também indicam teores que não são requisitados pela usina. Pode-se observar que as metas dos teores de ferro, níquel e sílica por magnésio foram atendidos em todos os resultados. O modelo matemático sem a FO3 precisou de um número maior de pilhas para encontrar a solução ótima, ilustrando a importância desta função objetivo. Na última linha da tabela é analisado o número de pilhas esgotadas, esta informação é muito importante para a mina. Quando o pátio de pilhas está completo, é necessário criar novos espaços físicos para estocar novas pilhas, essa operação gera um custo expressivo para a área.

6. Conclusões

Este trabalhou tratou um problema de blendagem de pilhas intermediárias em uma mina de níquel de uma indústria brasileira de mineração. O planejamento eficiente da blendagem de pilhas proporciona melhor operação das usinas de beneficiamento e o atendimento às solicitações dos clientes.

Uma formulação de programação linear inteira mista por metas foi proposta para resolver o problema. Nos experimentos computacionais foram utilizados estudos de caso reais de uma mina de níquel com até 200 pilhas intermediárias estocadas nos pátios. No total foram analisados 10 parâmetros de controle, dentre estes, destaca-se níquel, ferro e sílica por magnésio. Os resultados da formulação foram comparados aos elaborados pela equipe de planejamento da mina e comprovaram a eficiência da ferramenta de apoio à tomada de decisão. A equipe de colaboradores requer horas ou até dias para elaborar o planejamento. Com a ferramenta proposta foi possível obter planejamentos

https://proceedings.science/p/106877?lang=en

Tabela 3: Resultados para a instância 2 com 200 pilhas intermediárias.

Parâmetros de Qualidade	Especificação			Meta de Produção 70.000 ton		Meta de Produção 150.000 ton		Meta de Produção 300.000 ton	
	Teor Máximo (%)	Teor Mínimo (%)	Teor recomendado (%)	Modelo Matemático (%)	Modelo Matemático sem a FO3 (%)	Modelo Matemático (%)	Modelo Matemático sem a FO3 (%)	Modelo Matemático (%)	Modelo Matemático sem a FO3 (%)
Ni	2,3	1,8	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
Co	x	x	x	0,077	0,078	0,073	0,075	0,069	0,070
Fe	16,5	11	15,45	15,45	15,45	15,45	15,45	15,45	15,45
SiO2	x	x	x	38,06	38,06	37,97	37,96	37,73	37,72
MgO	x	x	x	23,69	23,67	23,58	23,55	23,53	23,53
Cr2O3	3	x	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,49	1,50
Al2O3	4	x	1,18	1,19	1,18	1,22	1,27	1,37	1,37
Ni/Co	x	25	30,55	30,69	30,55	31,96	31,74	35,08	34,61
SiO2/MgO	1,75	1,6	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
Fe/Ni	8	5	7,17	7,19	7,18	7,18	7,17	7,17	7,17
Produção (ton)				70.000	70.000	150.000	150.000	300.000	300.000
Número de Pilhas Utilizadas				7	12	11	16	19	21
Tempo de Execução (seg)				1	1	1	1	1	1
Número de Pilhas Esgotadas				2	4	6	9	15	16

ótimos em um limite de tempo pequeno, possibilitando ao decisor avaliar diversos cenários de maneira ágil.

Como trabalhos futuros pretende-se considerar outras características na formulação matemática, como distância percorrida pelos caminhões, custos dos equipamentos de carga e esforço das equipes de operação. Devido a natureza conflitante dos objetivos, também propõe-se tratar o problema como sendo de otimização multiobjetivo. Neste contexto, um conjunto de soluções não dominadas é retornado como resultado, cabendo ao decisor a escolha da solução mais adequada para o seu interesse.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto, ao Instituto Tecnológico Vale e às agências de fomento CNPq e FAPEMIG, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Referências

Chanda, E. K. C. e Dagdelen, K. (1995). Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 9(4):203–208.

Costa, F. P., Souza, M. J. F., e Pinto, L. R. (2005). Um modelo de programação matemática para alocação estática de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade. *Rem: Revista Escola de Minas*, 58(1):77–81.

Das, S. e Ragunathan, K. (2015). Mixed integer models for coal blending. In *Proceedings of the 6th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization*, p. 1–6, Istanbul, Turkey.

Farrokhpay, S., Fornasiero, D., e Filippov, L. (2018). Upgrading nickel in laterite ores by flotation. *Minerals Engineering*, 121:100–106. ISSN 0892-6875.

Fioroni, M. M., Franzese, L. A. G., Bianchi, T. J., Ezawa, L., Pinto, L. R., e Miranda, G. (2008). Concurrent simulation and optimization models for mining planning. In *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation*, p. 759–767, Miami, Florida. Winter Simulation Conference. ISBN 978-1-4244-2708-6.

Júnior, Ê. L., Ferreira, A., Moreira, V., e Euzébio, T. (2018). Fuzzy fault tolerant controller applied in an iron ore concentrate dewatering plant. In *Proceedings of the* 6^{th} *International Congress on Automation in Mining*, São Paulo, SP. GECAMIN.

Martins, A. G. (2013). Simulation of the brucutu mine operations using a linear programming model to allocate the loading equipment (in portuguese). Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brazil.

Mershmann, L. H. C. (2002). Development of an optimization and simulation system for the analysis of production scenarios in open-pit mines (in portuguese). Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção/COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil.

Shih, J. S. e Frey, H. C. (1995). Coal blending optimization under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 83:452–465.

https://proceedings.science/p/106877?lang=en

Silva, A. A., Souza, M. J. F., Guimarães, V. L., e Martins, A. G. (2014). Planejamento operacional de lavra: Um estudo de caso. In *Anais do XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, p. 2030–2041, Salvador. SOBRAPO.

Souza, M. J. F., Coelho, I. M., Ribas, S., Santos, H. G., e Merschmann, L. H. C. (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, 207(2):1041 – 1051. ISSN 0377-2217.

Souza, M. J. F. e Toffolo, T. A. M. (2018). Pesquisa operacional aplicada à mineração. Notas de aula. Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em `http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/POMineracao/arquivos/Dia-01.pdf`. Acesso em 01/03/2019.

Upadhyay, S. P. e Nasab, H. A. (2018). Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(2):153–166. ISSN 2095–2686.

White, J. W. e Olson, J. P. (1986). Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives. *Mining Engineering*, 38(11):1045–1054.

Xi-jin, G., Ming, C., e Jia-wei, W. (2009). Coal blending optimization of coal preparation production process based on improved ga. In *Proceedings of the International Conference on Mining Science & Technology*, volume 1, p. 654–660, Xuzhou, China.

Xu, D., Liu, L., Quast, K., Addai-Mensah, J., e Robinson, D. J. (2013). Effect of nickel laterite agglomerate properties on their leaching performance. *Advanced Powder Technology*, 24:750–756.

Yin, X., He, Z., Niu, Z., e Li, Z. (2018). A hybrid intelligent optimization approach to improving quality for serial multistage and multi-response coal preparation production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 47:199–216. ISSN 0278-6125.

https://proceedings.science/p/106877?lang=en