

**Arlem Wagner Rodrigues da Silva**

**UM MODELO MATEMÁTICO PARA A BLENDAGEM DE PILHAS DE NÍQUEL  
NA MINA DE ONÇA PUMA**

**Ourilândia do Norte, PA**

**2020**

Arlem Wagner Rodrigues da Silva

**UM MODELO MATEMÁTICO PARA A BLENDAGEM DE PILHAS DE NÍQUEL  
NA MINA DE ONÇA PUMA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em Beneficiamento Mineral.

Orientador: Luciano Perdigão Cota, D.Sc.

Coorientador: Thiago Antonio Melo Euzébio, D.Sc.

**Ourilândia do Norte, PA**

**2020**

Título: Um modelo matemático para a blendagem de pilhas de níquel na mina de Onça Puma

**Classificação:** ( ) Confidencial ( ) Restrita ( ) Uso Interno ( x ) Pública

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586u

Silva, Arlem Wagner Rodrigues da Silva  
Um modelo matemático para a blendagem de pilhas de níquel na mina de Onça Puma / Arlem Wagner Rodrigues da Silva - Ouro Preto, 2020.

36 f.: il.

Monografia (Especialização *latu sensu*) - Instituto Tecnológico Vale, 2020.  
Orientador (a): Luciano Perdigão Cota  
Coorientador (a): Thiago Antonio Melo Euzébio

1. Blendagem. 2. Níquel. 3. Pátios de Estocagem. 4. Pilhas. 5. Modelo Matemático.  
I. Cota, Luciano Perdigão. II. Euzébio, Thiago Antonio Melo. III. Título.

CDD. 23. ed. 622.7

Bibliotecária responsável: Nisa Gonçalves – CRB 2 – 525

**Arlem Wagner Rodrigues da Silva**

**UM MODELO MATEMÁTICO PARA A BLENDAGEM DE PILHAS DE  
NÍQUEL NA MINA DE ONÇA PUMA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Beneficiamento Mineral].

Orientador: Prof. Luciano Perdigão Cota

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 17 de agosto de 2020 pela banca examinadora constituída pelos professores:

---

Luciano Perdigão Cota  
Orientador – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)

---

Thiago Antonio Melo Euzébio  
Coorientador – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)

---

Gustavo Pessin  
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)

---

Roberto Gomes Ribeiro  
Membro externo

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).



## PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/B71A-888F-F47B-7006> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/B71A-888F-F47B-7006> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: B71A-888F-F47B-7006



### Hash do Documento

BF925685B995DFD522B4F8460B08175C8780EC7F100281684F64DBD81440100B

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 19/08/2020 é(são) :

- Roberto Gomes Ribeiro - 076.108.716-80 em 19/08/2020 12:16 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: rogorib@gmail.com

### Evidências

**Client Timestamp** Wed Aug 19 2020 12:16:33 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -20.0846369 Longitude: -44.7831366 Accuracy: 21.281999588012695

**IP** 189.91.178.231

### Hash Evidências:

57F5FE357C69E4421AAEA6C8224A1E142AFC5FCBD6186FCA74F5235E65E05BFE

- Gustavo Pessin (Signatário) - 939.084.900-49 em 19/08/2020 10:26 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: gustavo.pessin@itv.org

### Evidências

**Client Timestamp** Wed Aug 19 2020 10:24:41 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -19.959036599999997 Longitude: -43.9354748 Accuracy: 111

**IP** 177.208.48.218

### Hash Evidências:

891D9CE6659F67AF562A26E39820DF2A3E7FEA61836E515A98C2322638F04866

- Thiago Antonio Melo Euzébio (Signatário) - 017.511.735-77 em 18/08/2020 15:42 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: thiago.euzebio@itv.org

#### **Evidências**

**Client Timestamp** Tue Aug 18 2020 15:42:42 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -20.398086 Longitude: -43.5025057 Accuracy: 39

**IP** 191.5.80.188

**Hash Evidências:**

4FBE3C791819855EF099BA046D9A997C1249B4DD8EBCDF92F270906D02466B4A

Luciano Perdigão Cota (Signatário) - 067.976.936-67 em 18/08/2020 13:54 UTC-03:00

**Tipo:** Assinatura Eletrônica

**Identificação:** Por email: luciano.p.cota@itv.org

#### **Evidências**

**Client Timestamp** Tue Aug 18 2020 13:54:59 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

**Geolocation** Latitude: -20.3948032 Longitude: -43.496243199999995 Accuracy: 1733

**IP** 187.17.250.51

**Hash Evidências:**

35E716FFE96D8BECCDC51A575ECB5690CFDCF381F5EA8878826C0599830F23EC



Dedico esta, bem como todas às minhas demais conquistas, aos meus amados pais, minha irmã e minha esposa.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada, a todos os professores, orientadores, meus pais e minha esposa.

“A persistência é o caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

## RESUMO

Todo o minério de níquel lavrado é primeiro estocado em pilhas intermediárias, para depois, seguindo um plano de retomada, ser transportado para unidade de beneficiamento, desta forma, tem-se um alto custo com as construções dos pátios de estocagem, para os quais são necessários a construção de diques de contenção de sedimentos, licenças de supressão vegetal, decapeamento de grandes áreas, terraplanagem e sistemas de drenagem dos Pátios.

Neste trabalho foi proposto e implantado um modelo matemático para a blendagem ótima de pilhas intermediárias na mina de Onça Puma, da Vale S.A. Até a implantação do presente modelo, o plano de blendagem era executado de maneira manual e demandava horas para a execução. Além disso, diversas características relevantes ao processo não eram consideradas, como o número de pilhas utilizadas. O modelo matemático desenvolvido busca a minimização dos desvios para a meta de produção, dos desvios para a meta de qualidade do material e o número de pilhas utilizadas. Os resultados deste trabalho mostraram que o modelo é capaz de encontrar soluções ótimas em poucos segundos.

**Palavras-chave:** Blendagem. Níquel. Pátios de estocagem. Pilhas. Modelo Matemático.

## ABSTRACT

All the ore mined is first stored in intermediate stockpiles. Then, following a blending plan, the stored ore is transported to the processing plant. There is a high cost with the stockyards expansions, for which it is necessary sediment containment dikes, vegetation removal licenses, stripping large areas, earthworks and drainage.

In this work, a mathematical model is proposed and implemented for the optimal blending of intermediate stockpiles in the Onça Puma mine, owned by Vale S.A. Before the implementation of the model, the blending plan was executed manually and required some hours. Also, several features relevant to the process were not considered, such as the number of stockpiles used. The mathematical model developed seeks to minimize production target deviations, material quality target deviations, and the number of stockpiles used. This work showed that the model is capable of finding optimal solutions in a few seconds.

**Keywords:** Blend. Nickel. Stockyards. Stockpiled. Mathematical Model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de lavra, retomada e empilhamento de Onça Puma.....	17
Figura 2 – Pilhas intermediárias de uma mina de níquel.....	18
Figura 3 – Pilhas de Homogeneização.....	19
Figura 4 – Exemplos de utilizações de Níquel.....	21

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesos utilizados na função objetivo .....	27
Tabela 2 – Resultados para a instância 1 com 31 pilhas intermediárias .....	28
Tabela 3 – Resultados para a instância 1 com 200 pilhas intermediárias .....	29
Tabela 4 – Resultados para análise de 18 pilhas utilizando o modelo matemático .....	31
Tabela 5 – Resultados para análise da blendagem.....	32

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DS – Desenvolvimento Sustentável

ITV – Instituto Tecnológico Vale

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	Contextualização	16
1.2	Justificativa	19
1.3	Objetivos	20
1.4	Organização do Trabalho	20
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>21</b>
2.1	A Importância do Níquel	21
2.2	Trabalhos Relacionados	23
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISES, EXPERIMENTOS, GANHOS E RESULTADOS</b>	<b>27</b>
4.1	Análises e experimentos	27
4.2	Ganhos e resultados	29
4.2.1	Redução no tempo necessário para realizar o plano de blendagem	30
4.2.2	Otimização dos pátios	30
4.2.3	Planejamento futuro a partir da simulação de cenários	31
4.2.4	Confiabilidade do plano de blendagem	32
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>33</b>
5.1	Conclusões	33
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>34</b>
	<b>ANEXO A - Publicações geradas</b>	<b>36</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O Níquel é um elemento químico de símbolo Ni de número atômico 28 e de massa atômica 58,7 u. Em temperatura ambiente, o níquel encontra-se no estado sólido. Ele é um elemento de transição situado no grupo 10 da classificação periódica dos elementos. Seu ponto de fusão é 1.455 °C e foi descoberto em 1751 em Estocolmo na Suécia, pelo químico sueco Axel Cronstedt. Além disso, o minério níquel é um dos metais mais versáteis e importantes do mundo, com um mercado global que consome cerca de 2 milhões de toneladas 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 à temperatura extrema 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.

Níquel sulfetado e níquel laterítico 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 à 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 níquel laterítico (FARROKHPAY et al., 2018; XU et al., 2013). Neste trabalho estuda-se uma mina de níquel laterítico.

Este trabalho de conclusão tem como foco desenvolver um modelo de programação matemática para resolver o problema de blendagem de pilhas de níquel em uma mina de níquel da Vale, buscando otimização de recursos e dos pátios de estocagem. Além disso, permitindo o aperfeiçoamento do planejamento futuro da mina a partir da simulação de cenários e confiabilidade do plano de blendagem. Até então, a metodologia empregada nesta mina é baseada na utilização da ferramenta de Excel, sem análises de cenários, demandando um tempo elevado para os cálculos. O número de pilhas também não é considerado e, portanto, não há otimização dos pátios de estocagem de pilhas.

A unidade Onça Puma de Níquel foi escolhida para o desenvolvimento deste modelo, esta unidade possui duas minas em operação, mina do Puma e mina do Onça. Onça Puma iniciou a sua 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 (considerando operações com dois fornos). O investimento total de Onça Puma foi estimado em US\$ 2,841 bilhões.

Nesta unidade 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 intermediários, chamadas pilhas intermediárias. A Figura 1 ilustrar a sequência de processos entre a extração nas frentes de lavra e a formação de pátio de homogeneização para atendimento à usina.

Figura 1: Processo de lavra, empilhamento e retomada da mina de Onça Puma.



Fonte: O Autor.

Cada pilha intermediária possui materiais com uma classificação de teores e parâmetros de controle específica, definidos pela sondagem e por testes químicos realizados por meio de amostragem nas pilhas. Na Figura 2 são mostradas algumas pilhas intermediárias da mina.

Figura 2: Pilhas intermediárias da Mina de Onça Puma.



Fonte: O Autor.

O minério depositado nas pilhas intermediárias é utilizado 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 intermediárias. Todo o plano de blendagem tem como objetivo a formação das pilhas de homogeneização para a usina, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Pilhas de Homogeneização da mina de Onça Puma.



Fonte: O Autor.

## 1.2 Justificativa

A etapa de blendagem (ou mistura) tem uma grande importância no processo de tratamento de minério. Essa etapa consiste na determinação de quanto minério proveniente de um conjunto de pilhas deve ser misturado de modo a gerar um material que atende certas especificações do processo. Alguns parâmetros de controle são usados para caracterizar o produto, como percentagem de ferro, sílica, níquel, cobalto e manganês (PRO-010068, 2019).

Na mina objeto de estudo deste trabalho, o planejamento de blendagem das pilhas é realizado por um grupo de engenheiros e geólogos usando estratégias intuitivas e cálculos em planilhas digitais. Este grupo de colaboradores necessita 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.

Na literatura são encontrados diversos trabalhos que tratam de problemas de blendagem de minério em frentes de lavra e em minas de carvão (MERSHMANN, 2002; XI-JIN et al., 2009; UPADHYAY e NASAB, 2018; Yin et al., 2018). Os trabalhos da literatura, embasam a justificativa de utilizar uma abordagem científica de otimização para a resolução do problema de blendagem de pilhas intermediárias em uma mina de níquel. Problemas dessa natureza são extremamente complexos de serem resolvidos de

maneira eficiente usando estratégias intuitivas, por isso, foi proposto um sistema de suporte à decisão utilizando o *software* LINGO.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma formulação de programação matemática para o problema de blendagem de pilhas intermediárias em uma mina de níquel.

Os objetivos específicos listados abaixo permitem o alcance do objetivo geral:

- Desenvolver um sistema para otimizar os planos de blendagem, garantindo assim otimização de recursos, mão de obra e pátios;
- Avaliar a metodologia atual do plano de blendagem;
- Implementar o modelo matemático no *software* LINGO;
- Testar o modelo desenvolvido;
- Verificar pontos de melhoria da metodologia;
- Dar suporte à equipe de controle de qualidade em seu trabalho de executar o plano de blendagem das pilhas de homogeneização;
- Propor um sistema que reduza o tempo necessário para elaborar um plano de blendagem e que otimize a utilização dos pátios de empilhamento;
- Implantar o sistema desenvolvido na mina de Onça Puma e capacitar a equipe de controle da qualidade para utilizá-lo.

### 1.4 Organização do Trabalho

Os demais capítulos do trabalho seguem organizadas como a seguir. No Capítulo 2 é apresentando o referencial teórico. No Capítulo 3 é apresentado a caracterização do problema. No Capítulo 4 é apresentada a formulação matemática proposta. Os experimentos realizados com a implementação da formulação matemática são descritos no Capítulo 5. Finalmente, no Capítulo 6 são tratadas as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 A Importância do Níquel

Conforme ICZ (Instituto de Metais não ferrosos), o minério de níquel é um metal muito resistente à corrosão, por isso, 65% da produção mundial é destinada para a fabricação de aço inoxidável. O aço inoxidável é uma liga constituída principalmente por ferro, com 18% de cromo e 8% de níquel. Este aço é usado nas mais diversas aplicações, desde os simples instrumentos de cozinha até materiais para construção de trilhos de trem e para a construção de plataformas petrolíferas *offshore*. Outros 12% da produção mundial de níquel é direcionada para a fabricação de superligas de níquel. Já o restante, 23%, é destinado para a produção de outras ligas metálicas. Na Figura 3 são apresentados alguns produtos gerados a partir do níquel.

Figura 4: Exemplos de utilizações de Níquel.



Fonte: ICZ - Portal do Níquel.

Superligas a base de níquel são conhecidas desde a década de 1930, sendo utilizadas principalmente em aplicações aeroespaciais e plantas de geração de energia. Essas aplicações requerem um material com elevada resistência mecânica, boa resistência à fadiga, fluência e corrosão, e capacidade de operar continuamente em elevadas temperaturas.

O desenvolvimento das chamadas superligas, de níquel, de cobalto e de ferro começaram nos Estados Unidos nos anos de 1930, porém ao longo dos anos as superligas de níquel tornaram-se as mais utilizadas. Além das turbinas de jatos, as superligas de níquel encontram aplicações variadas em altas temperaturas, como em motores de foguetes, veículos espaciais, reatores nucleares, submarinos, usinas termoelétricas e

equipamentos petroquímicos. Entretanto, a principal aplicação dessas ligas continua sendo seu uso em turbinas de jatos de aviação.

Outros materiais como ligas de cromo, de outros metais de mais alto ponto de fusão e cerâmicos refratários têm sido estudados como possíveis alternativas ao uso das superligas de níquel, porém até o momento, não foi encontrado nestes materiais uma melhor combinação de propriedades requeridas para esse tipo de aplicação.

Algumas outras ligas que contêm níquel são apresentadas a seguir:

- O Monel é uma liga de níquel e cobre que é extremamente resistente à corrosão, como água salgada, sendo, por isso, utilizada na indústria naval e petrolífera. Além disso, por ser resistente a meios ácidos, é também utilizada na indústria alimentícia.
- A liga Incone possui resistência à corrosão sob tensão em meios com cloretos e a meios básicos, como soda cáustica. Porém, esta liga não impede a corrosão por pites ou por formação de depósitos na superfície das peças.
- Liga formadas por níquel e cromo são constituintes comuns nas resistências elétricas de torradeiras e fornos. Estas ligas geralmente são formadas por 11% a 22% de cromo e pequenas quantidades de outros elementos.
- Algumas cunhagens de moedas utilizam ligas de níquel. O exemplo mais famoso é a moeda de 5 centavos do dólar americano, que é designada por níquel, mas que de fato, possui apenas 25% de níquel na sua composição. Em Portugal também são cunhadas moedas a base de ligas de níquel.
- O Níquel Duro Químico é um tipo especial de revestimento que aumenta a resistência à corrosão e abrasão, além disso, não requer corrente elétrica, retificadores ou ânodos para que ocorra a deposição do metal.

## 2.2 Trabalhos Relacionados

O problema blendagem de minérios é amplamente tratado na literatura, existem trabalhos publicados desde a década de 80, como o de White e Olson (1986). Grande parte dos trabalhos tratam de aplicações em minas de ferro e de carvão.

Em Mersmann (2002) é proposto um sistema para resolver um problema de planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica dos caminhões que realizam o transporte, no qual a função objetivo é maximizar o ritmo de lavra. Em Fioroni et al. (2008) é proposto um modelo de simulação de eventos discreto que interage com um modelo matemático para a resolução de um problema de planejamento mensal de lavra. Em Xi-Jin et al. (2009) é proposto um método heurístico que combina os métodos *Simulated Annealing* e Algoritmo Genético para otimizar parâmetros de mistura de carvão. Em Martins (2013) são propostos um modelo matemático de programação inteira mista e um de simulação para um problema de planejamento operacional de lavra em uma mina de ferro, considerando alocações de caminhões e equipamentos de carga. Um problema de planejamento operacional de lavra com incertezas é tratado em Upadhyay e Nasab (2018). Algumas limitações existentes nas previsões de uma mina a céu aberto são consideradas. Em Yin et al. (2018) é proposto um algoritmo híbrido que combina *Machine Learning* com um algoritmo genético para tratar da blendagem de carvão.

Do nosso conhecimento, o problema de blendagem de pilhas intermediárias de níquel ainda não foi tratado na literatura. Portanto, busca-se resolver o problema em questão neste trabalho.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a formulação de programação linear inteira mista por metas para o problema tratado. A função objetivo de minimização é dividida em três parcelas: i) desvio da produção em relação a meta de produção estabelecida; ii) desvio de qualidade dos parâmetros de controle na mistura; iii) número de pilhas utilizadas. Os objetivos e restrições que tratam das metas de produção e qualidade foram inspirados no trabalho de Souza et al. (2010).

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

- **Parâmetros:**

- $M$ : Conjunto de pilhas intermediárias;
- $Q$ : Conjunto dos parâmetros de qualidade analisados no minério.
- $Pr$ : Massa total recomendada (ton);
- $Pl$ : Massa total mínima (ton);
- $Pu$ : Massa total máxima (ton);
- $\alpha^-$ : Penalidade por desvio negativo da produção;
- $\alpha^+$ : Penalidade por desvio positivo da produção;
- $t_{ij}$ : Teor do parâmetro  $j$  na pilha  $i$  (%);
- $t_{rj}$ : Teor recomendado para o parâmetro  $j$  (%);
- $t_{lj}$ : Teor mínimo admissível para o parâmetro  $j$  (%);
- $t_{uj}$ : Teor máximo admissível para o parâmetro  $j$  (%);
- $\beta_j^-$ : Penalidade por desvio negativo em relação ao valor recomendado para o parâmetro  $j$ ;
- $\beta_j^+$ : 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).

A formulação matemática é apresentada pelas equações (1) a (14).

Minimize:

$$(\alpha^- dp^- + \alpha^+ dp^+) + \sum_j^Q (\beta_j^- dm_j^- + \beta_j^+ dm_j^+) + \sum_i^M (pp y_i) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_i^M (t_{ij} - tu_i)x_i \leq 0 \quad \forall j \in Q \quad (2)$$

$$\sum_i^M (t_{ij} - tl_i)x_i \geq 0 \quad \forall j \in Q \quad (3)$$

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

$$\sum_i^M x_i \leq Pu \quad (5)$$

$$\sum_i^M x_i \geq Pl \quad (6)$$

$$\sum_i^M x_i - Pr + dp^- - dp^+ = 0 \quad (7)$$

$$x_i - Qu_i \leq 0 \quad \forall i \in M \quad (8)$$

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

$$\frac{y_i}{transpmin_i} \leq x_i \quad \forall i \in M \quad (10)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in M \quad (11)$$

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

$$dm_j^- - dm_j^+ \geq 0 \quad \forall j \in Q \quad (13)$$

$$dp^-, dp^+ \geq 0 \quad (14)$$

A função objetivo do problema é descrita pela equação (1) e busca minimizar os desvios da produção em relação a meta, os desvios em relação a meta de qualidade e o número de pilhas utilizadas. Os parâmetros  $\alpha^-$  e  $\alpha^+$  representam os pesos dados a uma produção abaixo e acima da meta, respectivamente. Os parâmetros  $\beta_j^-$  e  $\beta_j^+$  são os pesos dados a um desvio abaixo e acima da meta, respectivamente, para um parâmetro de controle  $j$ .

As equações (2) e (3) asseguram que os limites máximos e mínimos dos parâmetros de controle sejam respeitados. Na equação (4) busca-se calcular os desvios dos parâmetros de controle para a meta. As equações (5) e (6) definem que a massa total removida respeite os limites máximo e mínimo, respectivamente. A equação (7) calcula os desvios em relação a massa total recomendada. A equação (8) define que a massa total a ser extraída em uma dada pilha não pode superar a quantidade de material disponível. A equação (9) define as pilhas que são utilizadas no planejamento. A equação (10) assegura um limite mínimo de massa que pode ser removida de uma pilha. Na mina estudada não é viável economicamente remover pouca massa de uma pilha. O domínio das variáveis do modelo é definido nas equações (11), (12), (13) e (14).

## 4 ANÁLISES, EXPERIMENTOS, GANHOS E RESULTADOS

### 4.1 Análises e experimentos

A formulação matemática foi implementada no resolvidor LINGO, versão 10.0, da Lindo Systems Inc e os experimentos foram realizados em um computador Dell, com processador Intel(R) Core(TM) i5-7300U CPU @ 2.60GHz e sistema operacional Windows 10 de 64 bits. Duas instâncias reais da mina de Onça Puma da Vale S.A., localizada em Ourilândia do Norte-PA, foram utilizadas para validar o modelo matemático. Uma instância tem 31 pilhas intermediárias e a outra tem 200 pilhas intermediárias. Na especificação de qualidade são analisados 10 parâmetros de controle, dados a seguir.

- 1) Ni - Níquel;
- 2) Co – Cobalto;
- 3) Fe - Ferro;
- 4) SiO<sub>2</sub> - Sílica;
- 5) MgO - Magnésio
- 6) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de Cromo;
- 7) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de Alumina;
- 8) Ni/Co – Níquel por Cobalto;
- 9) SiO<sub>2</sub>/MgO - Sílica por Magnésio;
- 10) Fe/Ni - Ferro por Níquel.

Como os teores de qualidade têm grandezas distintas, seus valores foram normalizados. Além disso, na função objetivo do modelo matemático é necessário definir pesos para os parâmetros de acordo com a criticidade de cada parcela da função. Os pesos utilizados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Pesos utilizados na função objetivo.

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

Fonte: O Autor.

Observa-se que os teores de qualidade cobalto, sílica e magnésio isolados são irrelevantes. Por outro lado, teores como ferro, níquel e sílica por magnésio são de extrema importância, assim como, as metas de produção ( $\alpha^-$  e  $\alpha^+$ ). Os demais teores de qualidade possuem a criticidade muito importante e, por fim, a penalidade por uso de pilhas (*pp*) é considerada importante.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados para a primeira instância que possui 31 pilhas intermediárias e meta de produção de 43.000 toneladas. Já na Tabela 3 são apresentados os resultados para segunda instâncias que tem três metas de produção: 1) 70.000 ton; 2) 150.000 ton; 3) e 300.000 ton. Em ambas tabelas, as quatro primeiras colunas apresentam a especificação da blendagem solicitada pela usina. Somente para a primeira instância existe uma solução da equipe de planejamento, que necessitou de horas para elaborar o planejamento. Na segunda instância também foi analisado uma variação do modelo matemático sem a parcela da função objetivo que minimiza a número de pilhas utilizados no planejamento.

Tabela 2 - Resultados para a primeira instância.

Parâmetros de Qualidade	Especificação			Meta de Produção de 43.000 ton	
	Teor Máximo (%)	Teor Mínimo (%)	Teor recomendado (%)	Equipe Controle de Qualidade (%)	Modelo Matemático (%)
Ni	1,55	1,3	1,48	1,48	1,48
Co	X	X	X	0,006	0,006
Fe	16,5	X	11,57	11,57	11,57
SiO <sub>2</sub>	X	x	X	42,51	42,49
MgO	X	X	X	24,55	25
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	X	1,75	1,75	1,75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	X	1,11	1,11	1,11
Ni/Co	X	24	24,47	24,47	24,32
SiO <sub>2</sub> /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 Pilas Utilizadas				6	5
Tempo de execução (segundos)				-	1

Fonte: O Autor.

Tabela 3 - Resultados para a segunda instância.

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 o FO3 (%)	Modelo Matemático (%)	Modelo Matemático sem o FO3 (%)	Modelo Matemático (%)	Modelo Matemático sem o 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
SiO <sub>2</sub>	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
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	x	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,49	1,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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
SiO <sub>2</sub> /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				7	12	11	16	19	21
Tempo de execução (segundos)				1	1	1	1	1	1
Número de Pilhas Esgotadas				2	4	6	9	15	16

Fonte: O Autor.

As células identificadas com o caractere x indicam que os parâmetros de controle das células respectivas não foram especificados na requisição da blendagem, por isso, estes teores assumiram valores sintéticos na implementação do modelo matemático. Nas duas tabelas pode-se observar que o modelo matemático encontrou uma solução ótima de maneira instantânea, atingindo as metas de produção e de qualidade. Principalmente para os teores de maior importância, como ferro, níquel e sílica por magnésio. Além disso, utilizou-se um número de pilhas menor que a equipe de planejamento na primeira instância. Nos experimentos com a segunda instância também é analisado o número de pilhas esgotadas, esta informação é relevante. Um custo elevado é despendido quando é necessário criar novos espaços físicos nos pátios.

## 4.2 Ganhos e resultados

Durante o desenvolvimento deste trabalho, o modelo matemático proposto foi implantado na mina de Onça de Puma na forma de um sistema de suporte à decisão e a equipe de planejamento foi treinada para utilizá-lo. Com isso, diversos ganhos diretos e indiretos com a implantação da ferramenta de suporte à decisão foram identificados. Estes ganhos são descritos nas próximas subseções.

#### 4.2.1 Redução no tempo necessário para realizar o plano de blendagem

Observou-se após a implantação do sistema que o tempo necessário para realizar a blendagem reduziu da escala de horas para poucos segundos. Portanto, o número de horas trabalhadas (HH, ou “homem hora”) da equipe de planejamento não precisará ser aumentado com a expansão das operações da mina, que está acontecendo no momento. A equipe atual possui um técnico de mina e geologia II, especializado em controle de qualidade, antes da implantação do sistema, previa-se alocar mais um funcionário, um engenheiro de produção para colaborar nas atividades, o que não será mais necessário. O HH deste colaborador poderá ser realocado em outras atividades. Estima-se que o HH de um Engenheiro de Produção dedicado às atividades de controle de qualidade custa para empresa cerca de R\$429.000,00 por ano.

#### 4.2.2 Otimização dos pátios

Com o novo sistema de suporte à decisão foi possível otimizar o consumo das pilhas intermediárias, proporcionando liberação de áreas nos pátios de maneira mais rápida. Desta forma, foi minimizado o custo com a construção de novas áreas nos pátios para estocagem de novas pilhas. Além disso, reduziu-se os gastos operacionais com a retomada de pilhas, uma vez que o sistema de suporte à decisão minimiza o número de pilhas utilizadas na blendagem. Para cada pilha a ser retomada é necessário deslocar uma equipe de colaboradores, equipamentos de carga, caminhões, entre outros recursos. A Tabela 4 apresenta uma série de planos de blendagem elaborados com o sistema de suporte à decisão entre maio de 2019 e março de 2020.

Tabela 4 - Resultados para análise de 18 pilhas utilizando o modelo matemático

Período de Formação:	Pilha Homogeneizada:	TBU	Ni (%)	Fe (%)	Ni/Co	SiO <sub>2</sub> /MgO	Fe/Ni	Número de Pilhas
17/05/2019 à 23/10/2019	SE030	79.417	1,31	13,72	19,62	1,80	10,51	11
29/01/2020 à 04/02/2020	SE031	27.000	2,00	14,53	44,68	1,60	7,28	8
14/06/2019 à 03/10/2019	SW096	41.723	1,38	12,71	26,20	1,73	9,22	9
23/10/2019 à 11/12/2019	SW097	54.667	1,65	13,01	23,25	1,62	7,90	11
01/11/2019 à 18/11/2019	SW098	50.000	1,63	12,75	24,85	1,64	7,83	9
07/01/2020 à 17/01/2020	SW099	42.000	1,90	13,31	51,45	1,61	6,99	8
25/02/2020 à 02/03/2020	SW100	25.000	2,06	13,25	53,42	1,62	6,43	8
17/03/2020 à 16/04/2020	SW101	50.000	2,10	13,77	53,71	1,61	6,55	11
02/10/2019 à 07/11/2019	NW085	50.000	1,40	12,14	22,16	1,71	8,69	11
19/11/2019 à 22/11/2019	NW086	32.655	1,60	12,34	26,35	1,61	7,71	10
25/11/2019 à 29/11/2019	NW087	25.000	1,60	12,62	23,27	1,62	7,90	9
05/12/2019 à 26/12/2019	NW088	40.000	1,70	12,44	26,96	1,62	7,31	11
11/12/2019 à 17/12/2019	NW089	40.000	1,63	13,00	26,69	1,61	7,99	8
30/12/2019 à 15/01/2020	NW090	30.000	1,70	13,05	33,63	1,61	7,68	9
12/02/2020 à 25/02/2020	NW091	41.996	2,04	14,40	47,50	1,61	7,05	11
02/03/2020 à 17/03/2020	NW092	54.169	2,07	13,84	49,18	1,62	6,68	11
27/09/2019 à 05/12/2019	NE019	51.948	1,60	11,59	27,20	1,61	7,24	8
24/12/2019 à 15/01/2020	NE020	31.628	1,90	13,55	25,43	1,63	7,14	11

Fonte: O Autor.

#### 4.2.3 Planejamento futuro a partir da simulação de cenários

Na metodologia anterior, quando os planos de blendagem eram realizados de maneira manual, necessitava-se de horas para gerar um plano. Agora, com o sistema de suporte que precisa de pouco segundos para gerar um plano, introduziu-se a possibilidade de gerar inúmeras simulações de cenários para o planejamento futuro da mina de Onça Puma. Algumas destas simulações são descritas a seguir.

- Planejamento de longo prazo: uso do sistema de suporte à decisão para verificar quais os teores de controle global de todas as pilhas presentes nos pátios. Esta simulação permite que decisões estratégicas de longo prazo possam ser traçadas de acordo com o total de material estocado.
- Planejamento dos pátios com relação às requisições das usinas: uso do sistema de suporte à decisão para identificar como irá ficar os teores de

controle global das pilhas estocadas após a realização de um dado número de planos de blendagem. Por exemplo, é possível verificar como será o estoque após a execução de diversos planos de blendagem com requisição de alto teor de Níquel. Este tipo de simulação é fundamental para o planejamento de diversos setores, como usina e setor comercial.

- Planejamento dos pátios com relação às frentes de lavra: uso do sistema de suporte à decisão para prever como irá ficar os estoques de pilhas após a chegada de novos materiais das frentes de lavra, com os seus respectivos controles de qualidades. Este tipo de simulação permite o planejamento futuro dos pátios de estocagem com relação à chegada de materiais nos pátios e demais etapas da mina.

#### 4.2.4 Confiabilidade do plano de blendagem

O processo de produção utilizado na mina de Onça Puma é o processo pirometalúrgico, no qual o controle dos elementos contaminantes do processo, como SiO<sub>2</sub>/MgO e Fe, tem uma importância muito grande para a qualidade do ferro níquel e para a segurança na operação da usina. O sistema de suporte à decisão gerou mais confiabilidade nos planos de blendagem, já que os teores de controle são selecionados de maneira ótima. Um exemplo prático ocorreu em uma solicitação de 50.000 ton no qual foi especificado que o parâmetro de controle SiO<sub>2</sub>/MgO seja igual a 1,65. Este parâmetro é comumente especificado abaixo deste valor, por isso, o estudo teve como objetivo avaliar qual seria o impacto no teor de níquel deste material. A Tabela 5 mostra o plano de blendagem obtido respeitando o parâmetro de controle SiO<sub>2</sub>/MgO solicitado. A usina considerou o teor de níquel adequado para a especificação.

Tabela 5 - Resultados para análise da blendagem

Grade	Massa (tbn)	Massa (tbs)	Ni%	Co (%)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	MgO (%)	Ni/Co	SiO <sub>2</sub> /MgO	Fe/Ni
<b>AA</b>	8.000	6.160	2,13	0,05	18,09	36,86	20,00	40,59	1,84	8,49
<b>MA</b>	42.000	32.340	2,19	0,04	14,38	38,10	23,54	61,01	1,62	6,57
<b>BA</b>	0	0	2,21	0,04	12,51	38,06	26,17	62,44	1,45	5,65
Resultado	<b>50.000</b>	<b>38.500</b>	<b>2,18</b>	<b>0,04</b>	<b>14,97</b>	<b>37,90</b>	<b>22,98</b>	<b>56,56</b>	<b>1,65</b>	<b>6,87</b>

Fonte: O Autor.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

Este trabalho tratou um problema de blendagem de pilhas intermediárias na mina de Onça Puma da Vale S.A., em Ourilândia do Norte-PA. O planejamento eficiente da blendagem proporciona melhores operações das usinas de beneficiamento, dos pátios de estocagem, do atendimento às solicitações dos clientes e do planejamento de produção da mina.

Uma formulação matemática foi proposta para resolver o problema objetivando minimizar os desvios das metas de produção, os desvios das metas de qualidade e o número de pilhas envolvido no planejamento. A formulação matemática foi implementada em um resolvidor comercial e duas instâncias da mina estudada foram utilizadas para validar a formulação. Uma instância com 31 pilhas e outra com 200 pilhas, no qual 10 parâmetros de controle foram considerados. Os resultados validaram o modelo matemático que foi capaz de encontrar uma solução em poucos segundos, que antes demandava horas de trabalho. Posteriormente, o modelo matemático na forma de um sistema de suporte à decisão foi implantado na mina e outros ganhos foram observados. Dentre estes, destaca-se a otimização do espaço nos pátios, a possibilidade de simular diversos cenários e utilizar os resultados para o planejamento futuro da mina e, aumento da confiabilidade nos resultados da blendagem.

Como trabalhos futuros pretende-se considerar outras características na formulação matemática, como características da DMT (Distância Média Percorrida), que envolve a distância percorrida pelas máquinas, custos dos equipamentos de carga e esforço das equipes de operação. Além disso, pretende-se considerar também a blendagem de parte do material que poderá ser transportado direto das frentes de lavra para a usina.

## REFERÊNCIAS

CHANDA, E. K. C.; DAGDELEN, K. Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 9, n. 4, pp. 203–208, 1995.

FARROKHPAY, S.; FORNASIERO, D.; FILIPPOV, L. Upgrading nickel in laterite ores by flotation. **Minerals Engineering**, v.121, pp.100–106, 2018. ISSN 0892-6875.

FIORONI, M. M.; FRANZESE, L. A. G.; BIANCHI, T. J.; EZAWA, L.; PINTO, L. R.; MIRANDA, G. (2008). Concurrent simulation and optimization models for mining planning. **In Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation**, pp. 759–767, Miami, Florida, Winter Simulation Conference, 2008. ISBN 978-1-4244-2708-6.

ICZ, **Instituto de Metais não ferrosos – Portal do Níquel**. Disponível em: <http://www.icz.org.br/portaldoniquel/superligas.php>. Acesso em: 14 de Julho 2020. ICZ, 2020.

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

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 (Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção/COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

PRO-010068. **Procedimentos Operacionais, Controle de Qualidade de Minério e Estéril - Onça Puma, Rev. 9**, 2019.

UPADHYAY, S. P.; NASAB, H. A. Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 2, n. 28, pp. 153–166, 2018. ISSN 2095–2686.

WHITE, J. W. e OLSON, J. P. Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives. **Mining Engineering**, v. 38, n. 11, pp. 1045–1054, 1986

XI-JIN, G., MING, C., e JIA-WEI, W. Coal blending optimization of coal preparation production process based on improved ga. **In Proceedings of the International Conference on Mining Science & Technology**, v. 1, pp. 654–660, Xuzhou, China, 2009.

XU, D., LIU, L., QUAST, K., ADDAI-MENSAH, J., e ROBINSON, D. J. Effect of nickel laterite agglomerate properties on their leaching performance. **Advanced Powder Technology**, v. 24, pp. 750–756, 2013

**ANEXOS**

## **ANEXO A - Publicações geradas**

### 1. Artigo:

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

**Autores:** Arlem Silva, Ênio Lopes Júnior, Luciano Perdigão Cota, Thiago Antonio Melo Euzébio, Marcone Jamilson Freitas Souza

**Evento:** LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2019)

**Local:** Limeira, São Paulo

**Ano:** 2019

### 2. Relatório Técnico:

**Título:** Ganhos Qualitativos da Blendagem ótima de pilhas de Níquel em Onça Puma

**Autores:** Arlem Silva, Luciano Perdigão Cota, Thiago Antonio Melo Euzébio

**DOI:** 10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2020.21.Cota

**Ano:** 2020