

INCLUSION OF GEOMETALLURGICAL VARIABLES IN AN IRON ORE MINE SCHEDULING

BARBOSA, C. C. T.^{1*}, MAZZINGHY, D. B.², CAMPOS, P. H. A.²

¹Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (CPGEM) - UFMG

²Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3013-358X> *

caiobarbosa@ufmg.br *

Submetido 10/06/2024- Aceito xx/xx/2024

DOI: 10.15628/holos.2023.XXXX

ABSTRACT

This study highlights the importance of integrating geometallurgical variables in iron ore mine planning, providing an accurate and sustainable approach to operations in the Iron Quadrangle region in Brazil. The comparison between two scenarios, with and without geometallurgical variables, revealed a significant variation of 5% in the mass fed to the plant, and a 5.4% increase in

Life of Mine (LOM) for the geometallurgy approach. The inclusion of these variables not only optimized resource management, but also allowed us to accurately predict the processing capacity. The results highlight that including geometallurgical variables contributes to improving operational efficiency, making production goals more realistic, and increasing project predictability.

KEYWORDS: Geometallurgy, Scheduling, Iron ore, Iron Quadrangle.

INCLUSÃO DE VARIÁVEIS GEOMETALÚRGICAS NO SEQUENCIAMENTO DE MINA DE FERRO

RESUMO

Este estudo destaca a importância da integração de variáveis geometalúrgicas no planejamento da mina de minério de ferro, promovendo uma abordagem precisa e sustentável para as operações na região do Quadrilátero Ferrífero no Brasil. A comparação entre dois cenários, com e sem variáveis geometalúrgicas, revelou uma variação significativa de 5% na massa alimentada na planta e um aumento de 5,4% na Vida Útil da Mina (LOM) para a

abordagem geometalúrgica. A inclusão dessas variáveis não só otimizou a gestão dos recursos, mas também permitiu prever com precisão a capacidade de processamento. Os resultados evidenciam que a inclusão de variáveis geometalúrgicas contribui para melhorar a eficiência operacional, tornando as metas de produção mais realistas e aumentando a previsibilidade dos projetos.

PALAVRAS-CHAVE: Geometalurgia, Sequenciamento, Minério de ferro, Quadrilátero Ferrífero.

1 INTRODUÇÃO

No contexto do planejamento de lavra convencional, é comum empregar a abordagem de agregação, conforme descrita por Lerchs e Grossmann (1964), que se baseia em algoritmos amplamente adotados por empresas de mineração. Essa metodologia visa otimizar a sequência de extração dos blocos, levando em consideração os aspectos geotécnicos, econômicos e ambientais do depósito mineral. Para Whittle et al. (2005), o planejamento de mina é a metodologia que define o sequenciamento de lavra de blocos, garantindo a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) do projeto e respeitando certas restrições operacionais e de produção impostas ao projeto.

O planejamento de lavra abrange uma série de estudos e metodologias destinados a assegurar a extração e o tratamento econômico e sustentável dos ativos minerais de uma jazida. Uma das ferramentas fundamentais para esse fim é o modelo de blocos, que representa matematicamente um depósito mineral no espaço (Hustrulid & Kuchta, 2006). Este modelo divide o depósito em blocos de dimensões uniformes, cada um com atributos geológicos e econômicos distintos, como litologia, densidade, teor e parâmetros financeiros (Poniewierski, 2019). Com base em critérios específicos relacionados a esses atributos, os algoritmos classificam cada bloco como minério ou estéril, determinando assim seus destinos ao longo das operações de mineração. A geometurgia desempenha um papel crucial nesse processo, pois permite a compreensão de variáveis importantes do depósito, como recuperação e energia específica (Lishchuk, 2016).

Para Deutsch (2015), o objetivo da geometurgia é a agregação consistente de valor ao negócio. De acordo com McKee (2013), estudos geometúrgicos permitem um amplo conhecimento do depósito mineral e seu comportamento em diferentes operações de processamento, destacando-se os seguintes benefícios: otimização econômica das operações, modelagem do comportamento do minério na planta de processamento e refinamento do planejamento da mina.

Mata, Nader e Mazzinghy (2022) empregaram a energia específica e a recuperação da usina como variáveis geometúrgicas para desenvolver um sequenciamento de lavra, um cenário incomum devido à utilização de dados de ensaios geometúrgicos em quantidade suficiente para aplicar métodos geoestatísticos. Geralmente, a abordagem predominante é construir modelos geológicos e gerar sequenciamentos sem considerar os dados geometúrgicos. Mata, Nader e Mazzinghy (2022) destacaram a importância de integrar a modelagem geometúrgica às metodologias inovadoras de planejamento de minas, como o Sequenciamento Direto de Blocos (SDB). Os resultados da simulação ressaltaram a necessidade de considerar várias restrições operacionais e a inclusão da energia específica como uma variável geometúrgica para garantir um sequenciamento de lavra eficaz. A implementação da geometurgia foi fundamental para uma compreensão mais precisa da variabilidade dos parâmetros que influenciam o desempenho da mina e da usina.

Rodrigues et al. (2014) conduziram uma pesquisa na Samarco, empresa mineradora sediada no Quadrilátero Ferrífero, evidenciando uma forte correlação entre o consumo energético e outras propriedades do minério (perda por calcinação e teor de ferro). Com base nesses estudos, um modelo matemático foi definido para calcular a energia específica de cominuição, inserindo essa variável no modelo de blocos do depósito. Este estudo resultou na integração do modelo desenvolvido com os modelos de blocos da reserva, visando otimizar o planejamento de lavra e o dimensionamento das instalações de moagem.

Estudos demonstraram que a consideração de variáveis geometalúrgicas pode levar a um sequenciamento de lavra mais realista e eficaz, resultando em maior rentabilidade e sustentabilidade ambiental (Both & Dimitrakopoulos, 2023; Carrasco, Chilès, & Séguret, 2008; Rodrigues et al., 2014). O objetivo do presente trabalho é medir o impacto da integração de variáveis geometalúrgicas no planejamento e sequenciamento de uma mina de ferro, e investigar como essa abordagem pode melhorar a eficiência operacional e a sustentabilidade das operações mineradoras no Quadrilátero Ferrífero e regiões similares.

2 METODOLOGIA

Este estudo propõe uma comparação entre um planejamento de lavra convencional, que considera restrições geológicas (como ângulo de talude), parâmetros operacionais (como capacidade de produção da mina, custo unitário da lavra e diluição de mina), e a recuperação metalúrgica tratada como um valor fixo por litologia, desconsiderando a capacidade produtiva da usina. Em contrapartida, será avaliado um planejamento que incorpore, além das variáveis geológicas e operacionais, os parâmetros geometalúrgicos de forma mais detalhada, conforme mostra a Figura 1. Isso permitirá a análise das discrepâncias entre os dois tipos de planejamento, elucidando potenciais melhorias na eficiência e na rentabilidade da operação.

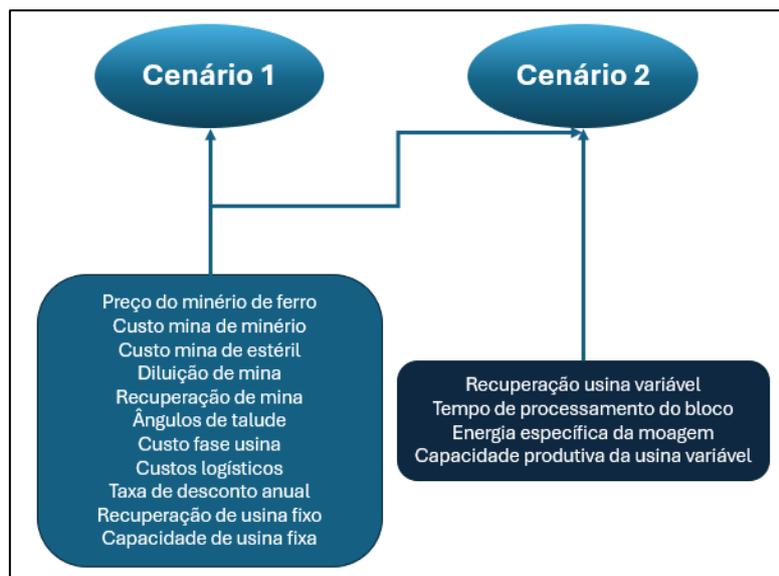


Figura 1: Diagrama ilustrativo das variáveis consideradas em cada cenário.

A pesquisa foi conduzida utilizando o software Studio NPVS versão 2.0.59.0a, desenvolvido pela empresa Datamine, para realizar as otimizações e o sequenciamento de lavra de uma mina de minério de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero. O modelo de blocos da mina foi utilizado como base para as análises, e duas otimizações e sequenciamentos foram realizados: o primeiro, denominado cenário 1, é aquele no qual não há variáveis geometalúrgicas; o segundo, denominado cenário 2, considera as variáveis geometalúrgicas de recuperação metalúrgica e a variável de energia específica como restrição de tempo de processamento. No cenário 1, a meta de produção

da usina é de 56 milhões de toneladas anuais, correspondendo a uma alimentação da planta de 100 milhões de toneladas de minério. No cenário 2, esses valores de alimentação e produção são variáveis, pois dependem das horas disponíveis da usina e da energia específica de cada bloco do modelo geológico.

Inicialmente, foram coletados e organizados os dados relevantes para a modelagem, incluindo informações descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Descrição de dados de entrada dos cenários.

Indicador	Cenário 1 (Base)	Cenário 2 (Variáveis geometalúrgicas)	Descrição
Preço do minério de ferro	US\$120,00	US\$120,00	Tonelada de produto
Custo mina de minério	US\$5,00	US\$5,00	Por tonelada
Custo mina de estéril	US\$3,00	US\$3,00	Por tonelada
Diluição de mina	5%	5%	
Recuperação de mina	95%	95%	
Ângulos de talude	Setorizado por litologias	Setorizado por litologias	Variando de 21º a 50º
Custo da usina	US\$7,00	US\$7,00	Tonelada de produto
Demais custos (expedição, porto, etc.)	US\$50,00	US\$50,00	Tonelada de produto
Dimensão dos blocos do modelo	25 x 25 x 13	25 x 25 x 13	Largura, comprimento e altura (metros)
Recuperação da usina	85%	Variável	Recuperação metalúrgica
Taxa de desconto anual	17%	17%	Taxa de viabilidade
Produção anual	56.000.000	Variável	Toneladas de produto
Alimentação da usina	100.000.000	Variável	Toneladas de minério
Restrição de horas disponíveis da usina	Não considerado	7884	Horas por ano
Tempo de processamento do bloco	Não considerado	Variável	Horas de processamento
Energia específica	Não considerado	Variável	kWh/t

A Tabela 2 mostra os tipos litológicos. Itabiritos com teor de ferro global superior a 49% são considerados ricos, enquanto aqueles com teor inferior a esse valor são classificados como pobres.

Os ângulos de talude foram considerados através de um estudo geotécnico prévio em que foram separados por setorização de litologia, gerando ângulos de talude que variam de 21º a 50º. As densidades foram consideradas para cada uma das litologias representativas dos blocos, seguindo como análises de laboratório com as amostragens realizadas em campo.

Tabela 2: Tipos litológicos no modelo de blocos com respectivas densidades.

Item	Litologias	Densidade (t/m ³)
Minérios compactos	Hematita compacta	4,70
	Itabirito compacto	3,27
Minérios friáveis	Hematita friável	3,26
	Itabirito friável rico	2,70
	Itabirito friável pobre	2,50
Estéreis	Xisto	1,89
	Filito	2,00
	Rocha básica	2,80
	Argila	2,32
	Estéril itabirito	2,00

A metodologia empregada consistiu na definição dos parâmetros do modelo de blocos e na realização dos sequenciamentos utilizando o software Studio NPVS. Para sequenciar, foram consideradas as variáveis GMet1 e GMet2, referentes, respectivamente, à recuperação de usina (%) e à energia específica (kWh/t) para cada um dos blocos. Desta forma, o tempo do processamento varia de acordo com a energia específica (kWh/t) e a massa de cada bloco.

No estudo conduzido por Rodrigues et al. (2014) na Mina de Alegria da Samarco Mineração, foi estabelecida uma correlação entre a energia específica (E) e a perda por calcinação (PPC), como descrito na Equação (1). Essa relação entre as variáveis é adotada neste trabalho, levando em conta a semelhança entre os tipos litológicos e a distribuição geográfica no Quadrilátero Ferrífero entre as minas da Samarco e a deste estudo. A variável PPC já faz parte do modelo geológico utilizado neste estudo.

$$E = 2,655 PPC + 0,321 \quad (1)$$

O parâmetro de recuperação não é aditivo e sua variabilidade espacial não pode ser adequadamente modelada por métodos geoestatísticos convencionais (Carrasco, Chilès, & Séguret, 2008). No entanto, estudos conduzidos por Wheaton (2019) revelaram correlações entre a variável de recuperação do processo e o teor do minério. Para a jazida de minério de ferro em questão, uma das estratégias adotadas envolve a realização de testes de concentração em minérios de diferentes teores entre compactos e friáveis, separadamente, resultando em curvas de recuperação versus curvas de teor através de modelos de regressão. Mata et al. (2022) conduziram um estudo sobre a recuperação metalúrgica em uma mina situada no Quadrilátero Ferrífero, uma região conhecida por suas jazidas de minério de ferro. Utilizou-se a equação proposta, derivada de testes de concentração em minérios com diferentes teores, que resultaram em curvas de regressão logarítmica. As Equações (2) e (3) estabelecem a correlação entre o teor de cada bloco e a variável de recuperação do processo, respectivamente, para as litologias de minério friável e compacto.

$$Rfe = 4.2 \ln (tFe) + 56.04 \quad (2)$$

$$Rfe = 4.2 \ln (tFe) + 63.29 \quad (3)$$

Onde “Rfe” é a recuperação da usina (%) e “tFe” é o teor de minério de ferro (%).

Para a planta de beneficiamento de minério de ferro, a capacidade de potência (P) instalada na usina é 59.500 kW. Cada bloco possui sua energia específica (E) e, portanto, a respectiva Taxa (T), em t/h (toneladas por hora), é calculada pela Equação (4):

$$T = P/E \quad (4)$$

O tempo de processamento individual (Tp), em horas, é calculado pela Equação (5).

$$Tp = M/T \quad (5)$$

A massa (M), em toneladas, é igual ao tamanho de cada bloco do modelo geológico 25 x 25 x 13 multiplicado pela densidade (d) *in situ* dada em toneladas por metro cúbico (t/m³).

Considerando energias específicas e diferentes densidades *in situ* para cada bloco, existem valores diferentes para os valores de M (massa do bloco) e T (taxa), o que impacta na distribuição da variável Tp (tempo de processamento) ao longo das litologias mineralizadas. Para medir e limitar o processamento anual máximo horário da usina (horas), foi adotado o seguinte regime anual de operação: 365 dias por ano, 24 horas por dia, e um rendimento operacional de 90%. Assim, o tempo de processamento global (TPG) é igual a 365 x 24 x 0,90 = 7.884 horas por ano. Foi carimbada a

variável T_p no modelo, referente ao tempo de processamento de cada bloco dado em horas levando em conta sua litologia.

O benefício de cada bloco é calculado internamente pelo software Studio NPVS. As Equações (6) e (7) são os cálculos do benefício para blocos de minério e estéril, respectivamente.

$$B_{mi} = (M_b \cdot t_{Fe} \cdot R_{fe} \cdot P_{VFe}) - (M_b (C_p + C_m)) \tag{6}$$

$$B_{es} = -(M_b C_m) \tag{7}$$

Onde: B_{mi} = valor dos blocos de minério (US\$); M_b = massa do bloco (t); t_{Fe} = teor de ferro (%); R_{fe} = recuperação de usina; P_{VFe} = valor de venda do minério por tonelada (US\$/t); C_p = custo do processo (US\$/t); C_m = custo mina (US\$/t); B_{es} = valor dos blocos de estéril.

Durante o processo de sequenciamento, foram ajustados os parâmetros de acordo com os objetivos estabelecidos, como maximizar o valor presente líquido (VPL) e minimizar os custos operacionais. Foram desenvolvidos alguns cenários para encontrar a melhor configuração da cava, levando em consideração as restrições operacionais e financeiras.

Para a análise comparativa, os resultados dos dois cenários foram avaliados em termos de quantidade de minério produzida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados das otimizações e sequenciamentos dos cenários 1 e 2, respectivamente. No cenário 2, a massa de minério apresentou uma redução de 180 milhões de toneladas em comparação com o cenário 1, devido à utilização da recuperação variável por bloco. Além disso, o Life of Mine (LOM) no cenário 2 é dois anos maior, pois limitamos a capacidade produtiva da usina com base no tempo de processamento disponível.

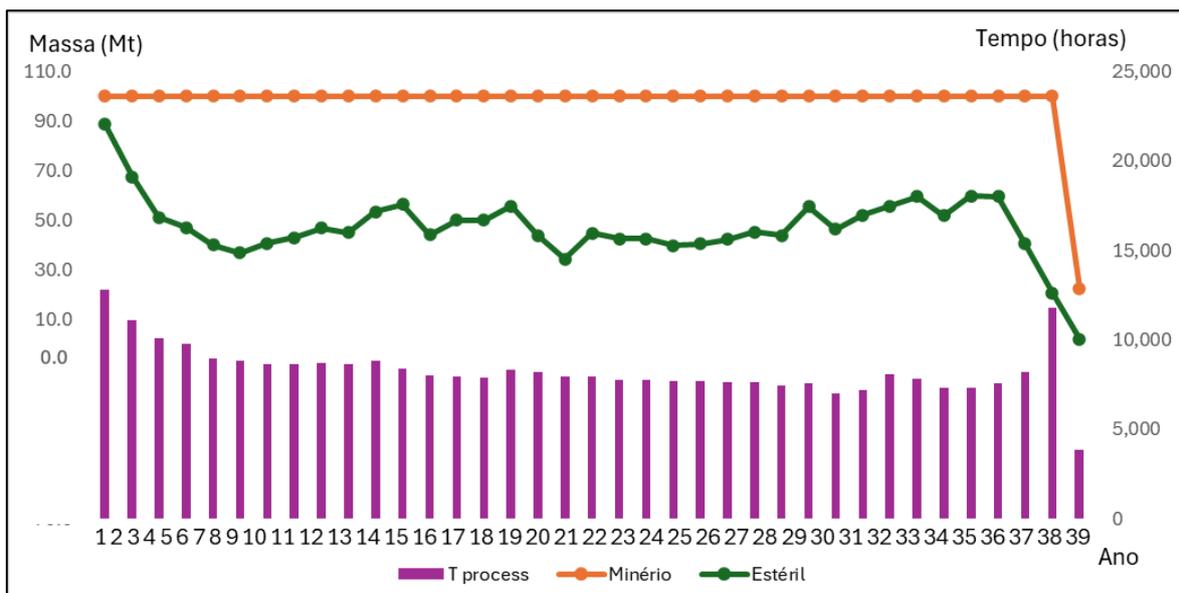


Figura 2: Gráfico de resultados do cenário 1.

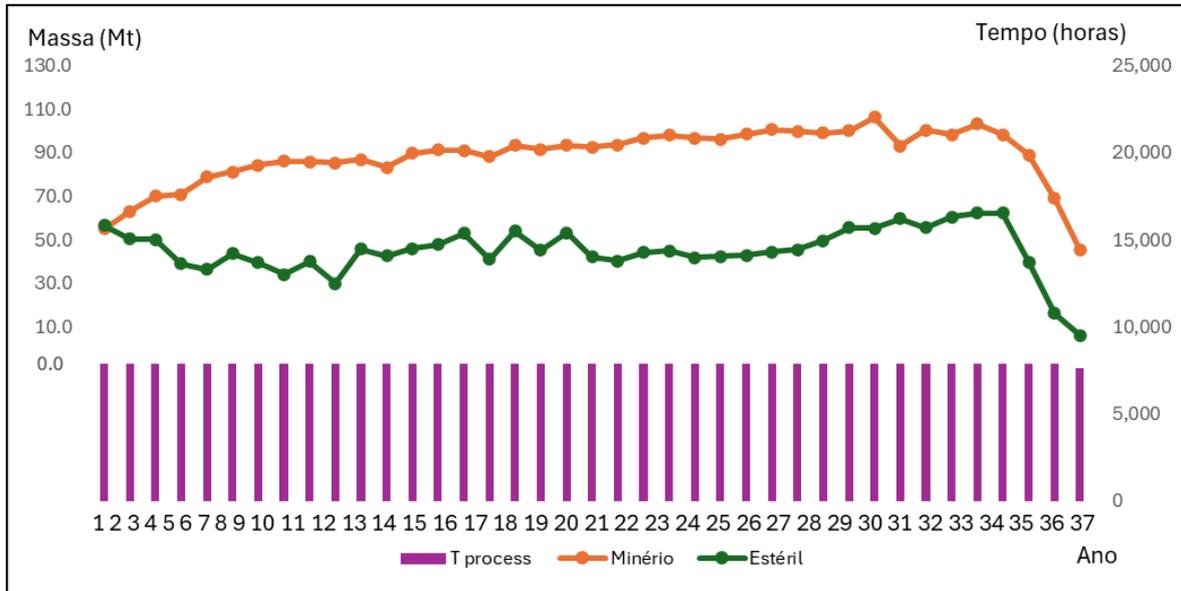


Figura 3: Gráfico de resultados do cenário 2.

A Figura 4 compara o tempo de processamento da usina e a alimentação da usina em massa. No cenário 1, sem considerar as variáveis geometalúrgicas, o tempo de processamento é variável, mas resulta em uma alimentação de minério constante. Por outro lado, no cenário 2, a alimentação da usina é limitada pela capacidade de processamento disponível, o que gera uma alimentação em massa variável.

O cenário 1 demonstra que os blocos lavrados nos anos iniciais possuem maior PPC e, conseqüentemente, maior energia específica, demandando mais tempo de processamento em comparação com os blocos localizados em profundidades maiores e sequenciados posteriormente.

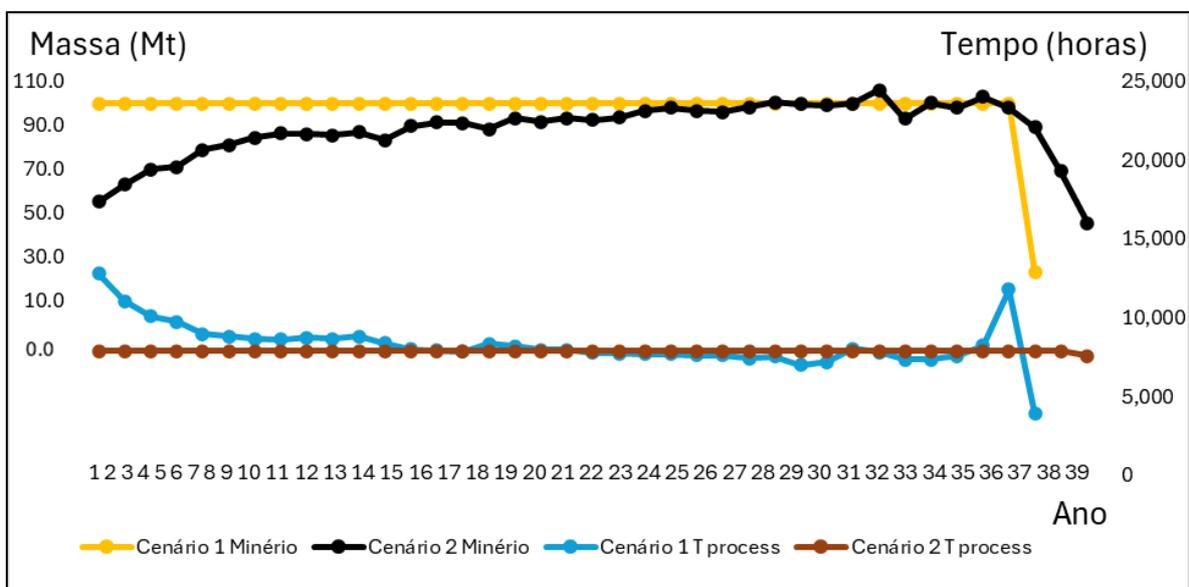


Figura 4: Gráfico comparativo das horas de processamento da usina entre os cenários 1 e 2.

O cenário 1 superestima a capacidade de produção nos anos iniciais, tornando o cenário 2 mais conservador nesse período.

Na análise comparativa entre os cenários que consideraram e não consideraram as variáveis geometalúrgicas, notou-se uma redução significativa de 5% na massa total de minério alimentada na usina, evidenciada na Figura 5. Esse resultado indica que a inclusão dessas variáveis no planejamento resultou em uma maior seleção dos blocos a serem processados, evitando a alimentação de material não viável e, portanto, melhorando a eficiência operacional do processo de beneficiamento.

Além disso, ao considerar as variáveis geometalúrgicas, foi observado um aumento de 5,4% no Life of Mine (LOM), como mostra a Figura 6. Esse acréscimo no LOM é altamente relevante, pois o cenário 1 é muito otimista e irreal, enquanto o cenário 2 é mais realista. Isso implica melhor previsibilidade econômica, pensando a longo prazo para a mineradora, além de contribuir para a estabilidade e o planejamento estratégico das operações.

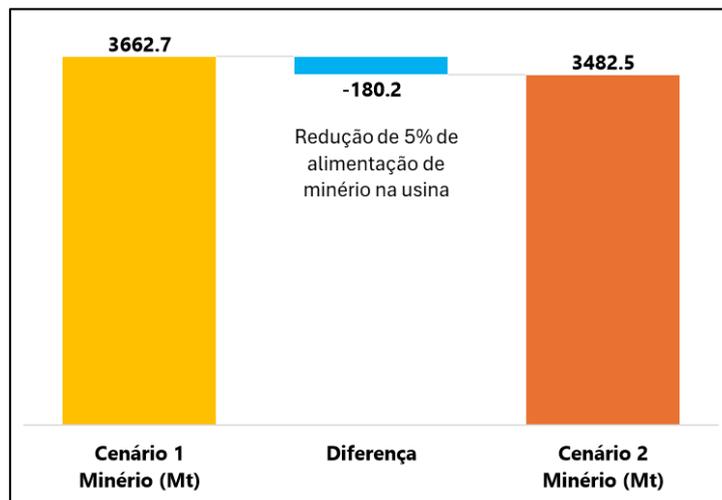


Figura 5: Gráfico comparativo da alimentação de usina total (em milhões de toneladas) entre os cenários 1 e 2.

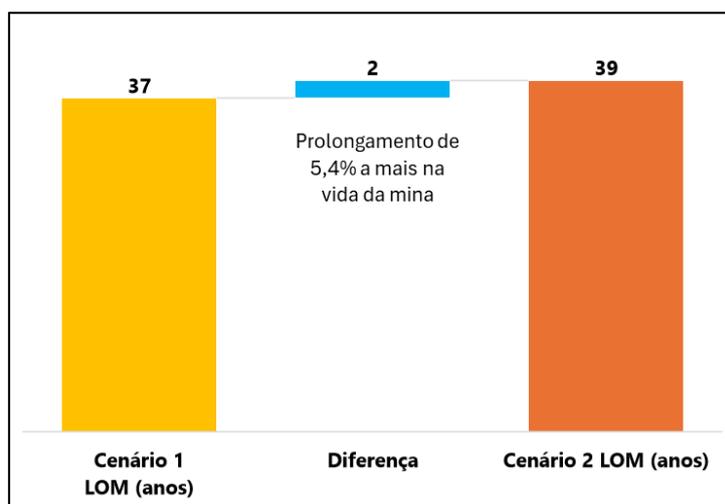


Figura 6: Gráfico comparativo do Life of Mine (LOM) em anos entre os cenários 1 e 2.

Essa abordagem também ressalta a necessidade de uma compreensão detalhada das propriedades geometalúrgicas do minério, como a mineralogia, granulometria, competência (tenacidade), energia específica, entre outros. Ao considerar as variáveis geometalúrgicas no sequenciamento de mina, é possível aprimorar tanto a qualidade do produto final quanto a eficiência operacional da planta de processamento.

4 CONCLUSÃO

Ao comparar os dois cenários, podemos observar que a inclusão das variáveis geometalúrgicas no cenário 2 permite uma gestão mais eficiente dos recursos. Isso ocorre porque ajustar a alimentação da usina conforme a capacidade de processamento proporciona uma otimização do uso dos recursos disponíveis, resultando em um prolongamento do Life of Mine (LOM) e em uma variação na alimentação da usina que melhor reflete a realidade operacional.

A utilização da variável geometalúrgica de recuperação da usina reduziu em 180 milhões de toneladas a massa de minério viável para processamento, representando 5% de variação entre os cenários. Esta exclusão é crucial, pois evita a perda de tempo e recursos em materiais que não atenderiam aos requisitos de recuperação, melhorando assim a eficiência global do processo.

Além disso, a incorporação da energia específica, refletida no tempo de processamento, aumentou o LOM em dois anos, representando 5,4% de variação entre os cenários, garantindo maior aderência e proximidade à realidade operacional da alimentação da usina. Este ajuste permite uma operação mais sustentável e previsível, proporcionando uma base mais sólida para o planejamento de longo prazo, e previsões orçamentárias para o planejamento de curto prazo e médio prazo.

O sequenciamento de minas de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, por meio da incorporação de variáveis geometalúrgicas, constitui um campo de pesquisa vital no setor da mineração. Essa abordagem pode influenciar significativamente a previsibilidade de um projeto, tornando as metas de produção mais realistas e confiáveis. Para as mineradoras, a incorporação dessas variáveis no planejamento de mina pode levar a decisões mais informadas e estratégicas, aumentando a eficiência operacional e reduzindo os riscos associados à variabilidade do minério.

Do ponto de vista do planejador de mina, esta metodologia permite um planejamento mais robusto e alinhado com a realidade operacional. Ao considerar as características geometalúrgicas, o planejador pode prever com maior precisão os desafios e necessidades do processo de mineração, resultando em um cronograma de produção mais eficiente e alinhado com a capacidade real da usina.

A inclusão de variáveis geometalúrgicas no sequenciamento de mina melhora a eficiência, aumenta a precisão das metas de produção e prolonga a vida útil da mina, oferecendo uma abordagem mais realista e sustentável para o planejamento de operações de mineração.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Datamine pelo fornecimento das licenças necessárias para realizar este trabalho e a mineradora Samarco pela disponibilização de sua base de dados para o desenvolvimento da pesquisa.

6 REFERÊNCIAS

- Both, C., & Dimitrakopoulos, R. (2023). Integrating geometallurgical ball mill throughput predictions into short-term stochastic production scheduling in mining complexes. *International Journal of Mining Science and Technology*, 33(2), 185–199. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.10.001>
- Carrasco, P., Chilès, J. P., & Séguret, S. A. (2008, December 1–5). Additivity, metallurgical recovery and grade. *Proceedings of the 8th International Geostatistics Congress*, Santiago, Chili.
- Deutsch, J. L. (2015). *Multivariate spatial modeling of metallurgical rock properties* [PhD Thesis, University of Alberta]. https://era.library.ualberta.ca/items/36c9b9bb-9ca6-47c5-b67a-c3e4660410f8/view/6d4cc53a-7691-4be4-9832-d4e58660dc29/Deutsch_Jared_L_201512_PhD.pdf
- Hustrulid, W., & Kuchta, M. (2006). *Open pit mine planning & design: Fundamentals* (Vol. 1) (2nd ed., revised). Taylor & Francis.
- Lerchs, H., & Grossmann, I. F. (1964, May 27–29). Optimum design of open pit mines. *Proceedings of the Joint CORS and ORSA Conference*, Montreal, Canada (pp. 17–24).
- Lishchuk, V. (2016). *Geometallurgical programs—Critical evaluation of applied methods and techniques* [PhD Thesis, Luleå University of Technology]. https://www.researchgate.net/publication/304539213_Geometallurgical_programs_-_critical_evaluation_of_applied_methods_and_techniques
- Mata, J. F. C., Nader, A. S., & Mazzinghy, D. B. (2022). Inclusion of the geometallurgical variable specific energy in the mine planning using direct block scheduling. *Tecnol Metal Mater Min*, 19, e2677. DOI:10.4322/2176-1523.20222677
- McKee, D. J. (2013). *Understanding Mine to Mill*. The Cooperative Research Centre for Optimising Resource Extraction (CRC ORE). <https://www.911metallurgist.com/C/What-is-mine-to-mill.pdf>
- Poniewierski, J. (2019). *Block model knowledge for mining engineers—An introduction* (Deswik Technical Report). Deswik. DOI:10.13140/RG.2.2.11503.69281
- Rodrigues, R. S., Bonfioli, L. E., Mapa, P. S., & Pinto, L. A. (2014, September 15–18). Development of a mathematical model to determine the grinding energy requirement of the iron ore reserve of SAMARCO Mineração S.A. *Proceedings of the 44th Seminar on Reduction of Iron Ore and Raw Materials*, Belo Horizonte, Brazil, 5093–5105. DOI 10.5151/2594-357X-25408
- Wheaton Precious Metals. (2019). *Technical report—Salobo III expansion. Salobo Copper-Gold Mine, Carajás, Pará State, Brazil*. https://s21.q4cdn.com/266470217/files/doc_downloads/2020/03/Salobo-Technical-Report-FINAL.pdf
- Whittle, D., Whittle, J., Wharton, C., & Hall, G. (2005). *Strategic mine planning* (8th ed.). Gemcom Software International Inc. https://www.researchgate.net/profile/David-Whittle/publication/272494349_Strategic_Mine_Planning/links/5c1192b7299bf139c7548042

/Strategic-Mine-
Planning.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnNOUGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uInB1
YmxpY2F0aW9uIn19



Recebido XXXX

Aceito: xx de xx de 2024

Publicado: xx de xx de 2024

