

Impacto econômico da lavra de barragens

Economic impact of dam mining

Impacto económico de la minería de presas

Recebido: 26/11/2020 | Revisado: 29/11/2020 | Aceito: 01/12/2020 | Publicado: 04/12/2020

Paulo Henrique Magalhães Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5433-8929>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: phmagalhaes13@gmail.com

Mateus dos Anjos Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3049-178X>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: mateusanjossilva2000@gmail.com

Felipe Ribeiro Souza

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

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

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

Resumo

Alguns acidentes ocasionados pela mineração estão relacionados à disposição dos rejeitos do processo de mineração. Atualmente há um grande debate sobre o melhor método de descomissionar barragens já existentes e armazenar os novos rejeitos. Baseado na análise de custo este projeto foi elaborado com o objetivo de medir a queda no valor do NPV de um empreendimento de mineração de ferro que optou por utilizar o material existente na barragem junto com o material extraído da mina em seu processo de beneficiamento. Utilizando o software NPV Scheduler, que utiliza como princípio de funcionamento o algoritmo de Lerchs e Grossmann, foram produzidos alguns cenários nos modos *Single* e *Multi Mine*, os quais foram comparados. Considerando um cenário ideal no ponto de vista econômico para determinar a queda nos lucros causados pelo descomissionamento. Após problemas durante a montagem dos cenários como a geração incorreta de pushbacks e a estacionalização de massas, resolvidos usando alguns cálculos manuais e aplicação de técnicas conhecidas como o *Pré Stripping*, foi possível definir o impacto econômico gerado pela barragem.

Palavras-chave: NPV; Pushbacks; Barragens; Sequenciamento.

Abstract

Some accidents caused by mining are related to the disposal of waste from the mining process. There is currently a great debate about the best method of decommissioning existing dams and storing the new tailings. Based on the cost analysis, this project was developed with the objective of measuring the fall in the NPV value of an iron mining enterprise that chose to use the material existing in the dam together with the material extracted from the mine in its beneficiation process. Using the NPV Scheduler software, which uses the Lerchs and Grossmann algorithm as operating principle, some scenarios were produced in Single and Multi-Mine modes, which were compared. Considering an ideal scenario from an economic point of view to determine the drop in profits caused by decommissioning. After problems during the setting up of scenarios such as the incorrect generation of pushbacks and the massing of masses, solved using some manual calculations and application of techniques known as Pre-Stripping, it was possible to define the economic impact generated by the resumption of the dam.

Keywords: NPV; Pushbacks; Dams; Sequencing.

Resumen

Algunos accidentes ocasionados por la minería están relacionados con el depósito de relaves del proceso minero. Actualmente existe un gran debate sobre el mejor método para dismantelar las presas existentes y el destino de los nuevos relaves. Con base en el análisis de costos, este proyecto se desarrolló con el objetivo de medir la caída del valor VPN de una empresa minera de hierro que optó por utilizar el material existente en la presa junto con el material extraído de la mina en su proceso de beneficio. Utilizando el software NPV Schedule, que utiliza el algoritmo de Lerchs y Grossmann como principio operativo, se produjeron algunos escenarios en los modos *Single* y *Multi Mine*, que se compararon. Considerando un escenario ideal desde el punto de vista económico para determinar la caída de beneficios provocada por el dismantelamiento. Luego de problemas durante el montaje de escenarios como la generación incorrecta de retrocesos y la masificación de masas, resueltos mediante unos cálculos manuales y aplicación de técnicas conocidas como *Pre-Stripping*, se pudo definir el impacto económico generado por la reanudación de la presa.

.Palabras clave: VPN; Pushback; Presas; Secuenciación.

1. Introdução

A atividade de mineração é de suma importância por fornecer matéria prima para a maioria das indústrias. Insumos para áreas como construção civil, metalurgia, siderurgia e agricultura. Em relação à economia, a atividade minerária no Brasil é responsável por quase 5% do PIB, além de gerar milhares de empregos diretos e indiretos(Tuck, 2020). Mesmo com todas as contribuições citadas, a atividade de mineração causa um impacto ao meio ambiente, caracterizado de diversas formas. Dentre elas, daremos atenção especial ao impacto causado pelas barragens de rejeitos.

As barragens são feitas como forma de deposição de rejeitos gerados durante o processamento do material extraído da lavra, que acontece com o intuito de obter um produto final com a maior concentração possível(Kennedy, 1990). O problema existente nesse método de deposição de rejeitos é que muitas vezes, as barragens nunca param de receber material, tomando assim dimensões muito grandes e que podem oferecer alto risco de acidentes dependendo do projeto de execução da mesma (Hustrulid & Mccarter & Zyl 2001).

Recentemente tivemos dois grandes exemplos de acidentes envolvendo barragens de rejeitos, sendo o primeiro no ano de 2015, com o rompimento da barragem de Fundão, da mineradora Samarco, no município de Mariana, e o segundo no ano de 2019, com o rompimento da barragem B1 da Mina de Córrego do Feijão da mineradora Vale, em Brumadinho. O principal ponto em comum entre os dois rompimentos é o tipo de alteamento utilizado na construção das mesmas, o denominado alteamento a montante. O alteamento a montante era bastante utilizado até então, sendo encontrado em 88 das 717 barragens registradas no sistema da Agência Nacional de Mineração (ANM), devido ao baixo custo e facilidade de construção, sendo possível aumentar o tamanho da barragem sempre que necessário. Após esses acidentes iniciou-se uma discussão sobre possíveis métodos que poderiam ser utilizados para o descomissionamento dessas barragens, tendo em vista que elas não são seguras e apresentam riscos se continuarem sendo utilizadas ou abandonadas. Dentre as diversas técnicas que podem ser usadas para descomissionar as barragens, a principal é o esvaziamento e desmonte das estruturas, podendo ocorrer ou não o aproveitamento econômico do material existente(Randolph, 2011). Em relação ao aproveitamento do rejeito, existem estudos que tem como objetivo descobrir a melhor forma de fazê-lo, sendo que este pode ocorrer desde a transformação do rejeito em insumos para construção civil, até mesmo a utilização do mesmo no processamento da mina. Pois várias dessas deposições foram

realizadas em um período de menor desenvolvimento tecnológico, em que não havia tecnologia para recuperar o minério contido.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo medir, através da utilização de uma metodologia de sequenciamento de mina a viabilidade econômica de um empreendimento que optou por utilizar a técnica de lavar a barragem/pilha de rejeitos, conjuntamente com a cava, utilizando o material da mesma para alimentação da planta de beneficiamento. Durante a realização, foram encontradas dificuldades na estacionalização de massas na alimentação da usina, pois o software não levava em consideração o decapeamento que deve ser realizado nas frentes de lavra, extraindo assim muito material em determinados períodos e quase nenhum em outros. Após a aplicação de uma técnica denominada *pré-stripping* o problema foi solucionado e chegamos à conclusão de que, no cenário escolhido, utilizando determinados parâmetros, a utilização da lavra da barragem/pilha ocasionou não uma queda no valor presente líquido (VPL) do empreendimento, mas sim um leve aumento (Burgarelli, et al. 2018) (Souza & Melo 2014).

2. Metodologia

A metodologia do trabalho está relacionada a consolidação do conhecimento científico. Pois alguns dos resultados dos experimentos realizados são de conhecimento empírico e qualitativo. O trabalho desenvolvido baseado em metodologia científica consolida resultados quantitativos (Pereira et al. 2018).

Com objetivo principal de avaliar o retorno econômico do sequenciamento considerando a retomada da barragem de rejeitos de um empreendimento de mineração. Este projeto foi elaborado a partir de dados fornecidos de um empreendimento em operação no Quadrilátero Ferrífero situado no estado de Minas Gerais, Brasil. O modelo de blocos recebido continha informações litológicas e de teor, além de informações dos corpos geológicos, barragem e topografia atualizada. Para construção do modelo econômico configuramos com os valores contidos na Tabela 1, que foram baseados em fatores de compra, venda e custos do mercado atual. Os valores contidos na Tabela 1 serão utilizados para composição da função benefício para estimar a receita de cada tonelada de minério.

Tabela 1 - Parâmetros adotados para geração de modelo econômico.

Preço de venda (Todos os produtos)	70 \$/t de produto
Custo de venda (Todos os produtos)	15 \$/t de produto
Custo de lavra (Rocha rico e pobre)	2,2 \$/t de ROM
Custo de lavra (Pilha de estéril)	8,8 \$/t de ROM
Custo de beneficiamento (Rocha rico e pobre)	3,85 \$/t de ROM
Custo de beneficiamento (Pilha de estéril)	10 \$/t de ROM
Recuperação metalúrgica	90%
Teor do concentrado	65%
Diluição	0
Recuperação	100%

Fonte: Autores.

A cava final determina o volume que a reserva pode possuir, dependendo de fatores como quantidade de material que se deseja extrair. Tempo e outros fatores econômicos são utilizados pelo algoritmo de maximização do valor presente líquido proposto por Lerchs & Grossmann, para o sequenciamento da mina.

Analizamos qual a cava aninhada seria a mais viável para prosseguirmos com o sequenciamento. Para a escolha da mesma partimos do princípio que seria preciso um empreendimento que extraia uma quantidade de rocha não muito grande obtendo o maior valor de NPV possível, tendo em vista que a avaliação final será feita em termos econômicos, mas não poderíamos deixar de avaliar a quantidade de material presente na pilha de rejeitos devido ao fato de que a pilha não possui material até determinado formato de cava final, e que se utilizássemos uma cava que possui pouco material de pilha, a avaliação poderia ser prejudicada.

3. Revisão Teórica

Para realização desse trabalho, utilizamos como ferramenta principal o software NPV Scheduler da empresa Datamine. O mesmo utiliza como principal componente de funcionamento um algoritmo que define a cava final ótima para o empreendimento proposto

por Lerchs e Grossmann e também possui um módulo de sequenciamento denominado Multi Mine, que nos permitiu sequenciar em conjunto a cava e a pilha de rejeitos. A partir de então, serão apresentados e contextualizados nesse tópico os conceitos mais importantes utilizados no decorrer do trabalho.

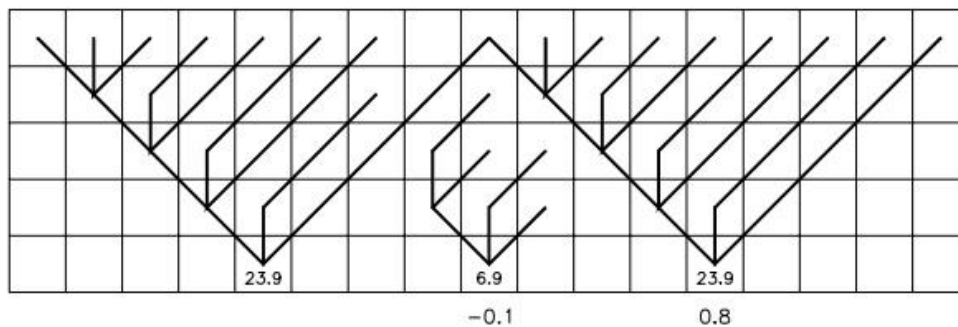
3.1 O algoritmo de Lerchs – Grossmann

Baseados na teoria dos grafos, Lerchs e Grossmann apresentaram em 1965 dois algoritmos para definição de cava final otimizada, sendo que um deles trabalha em duas dimensões e o outro em três (Lerchs & Grossmann 1965).

Segundo Noronha e Gripp (2001), Lerchs e Grossmann propuseram um algoritmo matemático que permite desenhar o contorno de uma exploração a céu aberto de tal forma que se maximize a diferença entre o valor total da mineralização explorada e o custo total da extração de minério do estéril.

O método trabalha a partir de um modelo de blocos, criado segundo um modelo geológico, e progressivamente constrói matrizes de blocos relacionados que devem, ou não, serem lavrados. A matriz resultante define uma superfície de cava final, que possui o maior valor econômico possível, sujeito a restrições de ângulos de taludes gerais para a cava. Esta superfície inclui todo bloco que deve ser lavrado, levando em conta o estéril a ser decapeado, de modo a torna-lo acessível. Ele também exclui todo bloco que não deve ser lavrado. Estes blocos são dispostos segundo um valor econômico total positivo, consistido do valor do produto recuperável, diminuído dos custos de lavra e beneficiamento. Blocos de estéril e de ar tem valores negativos e zero, respectivamente. Os objetivos típicos são: maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) ou a Taxa Interna de Retorno (TIR). O método sinaliza cada bloco que potencialmente pode ser lavrado. Durante o processo de otimização, estas sinalizações podem ser ativadas ou desativadas muitas vezes. Um bloco é sinalizado para ser lavrado se finalmente pertence a um grupo de blocos cujo valor total é positivo. Estes grupos são chamados ramificações. (Whittle, 1990). A Figura 1 apresenta os grafos utilizados no processo de otimização de cava. Qual é possível identificar os blocos superiores que devem ser lavrados para que o bloco inferior possa ser acessado.

Figura 1 - Representação do Algoritmo de Lerchs e Grossmann 3D (Fonte: Whittle, 1990).



Fonte: Autores.

3.2 Definição dos pushbacks

O algoritmo de Lerchs e Grossman citado anteriormente, requer a definição de alguns valores e parâmetros para seu funcionamento. Um desses parâmetros funciona como um penalizador, que aplica um desconto nos lucros, fazendo assim que a cava final gerada seja condizente com a realidade, tendo em vista que a medida que um empreendimento de mineração evolui com o tempo, tem um valor de gastos maior, e que o preço do material extraído pode vir a oscilar muito e até mesmo diminuir drasticamente (Whittle, 2016).

Dessa forma, aplicando-se valores diferentes para esse parâmetro penalizador, é gerado um conjunto contendo cavas de tamanhos diferentes, as quais ficam compreendidas uma dentro da outra, o que chamamos de conjunto de cavas aninhadas, limitadas por uma cava menor, a qual seria a mais benéfica em termos de lucro, e uma maior, menos benéfica.

Partindo desse princípio, a menor cava gerada nesse conjunto serve como um ponto de referência de qual o local mais adequado para o início da cava. Em contrapartida, a maior cava fornece informações de onde serão os locais mais adequados para a instalação da infraestrutura da mina.

Segundo Souza (2018), os *pushbacks* podem ser entendidos como porções de material individuais e incrementais, partindo da porção da jazida que fornece o maior fluxo de caixa até a cava final, que serão extraídos segundo uma sequência, não sendo necessário o fim da lavra de um *pushback* para o início do próximo.

Mathieson (1982), fornece um resumo básico de como se deve realizar a definição dos *pushbacks*:

- Antes de fazer o trabalho de design, faz-se necessário observar os seguintes parâmetros:

- a) Ângulo geral de talude e bermas apropriadas;
 - b) Tonelagem de minério e estéril mínima lavrada em cada fase;
 - c) Dimensões dos equipamentos usados na lavra, para determinar o layout da praça.
- A partir das informações anteriores determina-se o design de cada fase e faz-se a construção de rampas e acessos em todas as bancadas;
 - Análise de massas e teores em cada bancada;
 - Por fim o planejamento de lavra de acordo com as quantidades impostas pela alimentação da usina anualmente.

3.3 Sequenciamento Multi Mina

Como dito no início desse tópico, um fator de extrema importância na realização desse trabalho foi a utilização de um módulo existente no NPV Scheduler que permite o sequenciamento simultâneo de mais de uma cava. Este recurso, conhecido como sequenciamento Multi Mina é bastante utilizado em projetos em que o programador precisa produzir um cenário no qual a mina em questão compreende mais de uma cava, e que sequenciá-las separadamente não é eficaz (Whittle, 2016).

O conceito do sequenciamento Multi Mina pode se dividir em duas principais vertentes de estudos. Uma delas tem como objetivo gerar uma estacionalização de massas que são lavradas na mina, otimizando assim a utilização dos equipamentos utilizados tanto na extração como no transporte desse material da mina até a usina. Ozdemir e Kumral (2019) produziram um trabalho utilizando esse tipo de sequenciamento, visando otimizar o sistema de despacho de uma mina constituída de três poços, nos quais estão distribuídas 7 pás carregadeiras e 36 caminhões, sem levar em consideração a quantidade de massa movimentada. Após a implementação de um algoritmo que se mostrou eficaz quando aplicado em seu projeto, obtiveram como resultados uma melhora no aproveitamento dos equipamentos, gerando um ganho nos lucros e também deduziram um método que pode ser utilizado em outros empreendimentos de mineração ou que utilizem equipamentos de grande porte.

Por outro lado, a segunda vertente de estudos tem como objetivo principal otimizar o Valor Presente Líquido (VPL) da mina em questão através de técnicas de otimização de lavra e recursos que permitem o controle e previsão de como será o funcionamento da mesma ao passar do tempo. Montiel e Dimitrakopoulos (2015) realizaram um estudo no qual tinham

como objetivo implementar o sequenciamento Multi Mina em uma mina de cobre constituída por dois poços através de um algoritmo de recozimento, utilizando paralelamente métodos heurísticos para obtenção de melhores resultados. Segundo eles o objetivo ao otimizar um complexo de mineração é maximizar o dinheiro descontado dos fluxos, minimizando o desvio da mineração e metalurgia. O algoritmo por eles utilizado tem como princípio a aplicação de três tipos de variações em determinados parâmetros em cenários existentes, variações essas chamadas de perturbações. As perturbações foram divididas em baseadas em blocos, baseadas em alternativas operacionais e baseadas em sistemas de transporte. Por fim, o algoritmo mostra qual o ganho ou perda no valor do VPL gerado através das combinações de perturbações escolhidas.

A abordagem do sequenciamento utilizada nesse trabalho se baseia na segunda vertente, sendo que será feita uma análise em termos de variação de massa extraída da mina sem levar em consideração questões atribuídas a equipamentos de extração e transporte.

3.4 Aplicação da pilha de rejeitos no sequenciamento

Como o objetivo desse trabalho é medir o impacto econômico no empreendimento em questão quando se é obrigado a lavar a pilha de rejeitos paralelamente a cava, utilizamos uma técnica que consiste em considerar a pilha como uma segunda reserva lavrável compreendida na mina e sequenciá-la. Será utilizado o método Multi Mina, juntamente com a cava. Para isso foi elaborado um modelo de blocos, similar ao da cava, mas que continha as informações referentes a pilha de rejeitos(Orman & Peevers & Sample 2011).

Asad (2005) elaborou um trabalho que tem como objetivo desenvolver um algoritmo de otimização de grau de corte que leve em consideração durante sua construção a utilização de pilhas de estoque, utilizando como base para isso um caso hipotético de uma mina a céu aberto da qual seriam extraídos dois tipos distintos de minerais aproveitados economicamente. Ele parte do princípio proposto por Mahammad e Khan (2003) que diz que existem duas opções para utilização da pilha de estoque, sendo que na primeira, o estoque é retomado paralelamente a atividade de lavra, suprindo possíveis deficiências na alimentação da usina ao longo da operação, ou, pode ser retomado apenas no final da atividade de lavra, dando uma sobrevida ao empreendimento antes do término de suas atividades.

Na elaboração desse trabalho, partimos da primeira premissa citada, com um diferencial no fato que sequenciamos uma pilha de rejeitos, material este que normalmente não é reutilizado no processamento, e que este não é utilizado como complemento para o

material proveniente da cava, e sim como um novo tipo de material utilizado para alimentar a usina.

4. Discussão dos resultados

4.1 Resultados preliminares

O algoritmo de cava final gera uma série de cavas aninhadas em que o ganho econômico das maiores cavas é semelhante a cavas menores. A Tabela 2 mostra que foi selecionado a cava cujo o preço de venda é 77% do preço nominal do minério. Além de informar a tonelagem total de minério e o valor presente líquido do empreendimento.

Tabela 2 - Parâmetros da cava final.

Elemento	Valor
Fator	77%
Rocha	466217520 t
NPV	168729183 \$
Pilha	18770480 t
Rico	294139360 t
Pobre	22545520 t
Estéril	130762160 t
Teor de Fe	25%

Fonte: Autores.

Após a escolha da cava final, utilizamos uma ferramenta do software que permite controlar o número máximo de *pushbacks* da mina. Por fim geramos cenários de como serão os valores de massa, teor, lucro e tempo de vida do empreendimento através de variáveis que podem ser configuradas da forma mais conveniente para o sequenciamento do seu projeto.

4.2 Dos cenários

Foram elaborados cenários com objetivo de avaliar o impacto da lavra da barragem no valor econômico do empreendimento. O primeiro cenário foi formulado de forma que o software tivesse liberdade de trabalhar com seu algoritmo de sequenciamento de forma livre, visando a maximização do NPV, utilizando os parâmetros citados na Tabela 3.

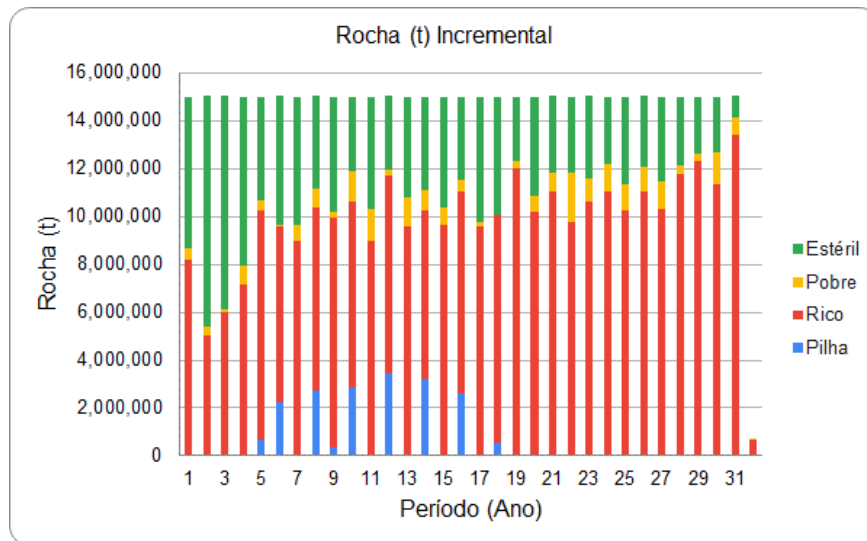
Tabela 3 - Parâmetros.

	Restrições Fixas	Restrições Variáveis		
	Movimentação de rocha (milhão de t)	Movimentação de minério (rico + pobre + pilha) (milhão de t)	Teor de alimentação da usina (%)	Movimentação de material de pilha (milhão de t)
Meta	15	12	35	1,2

Fonte: Autores.

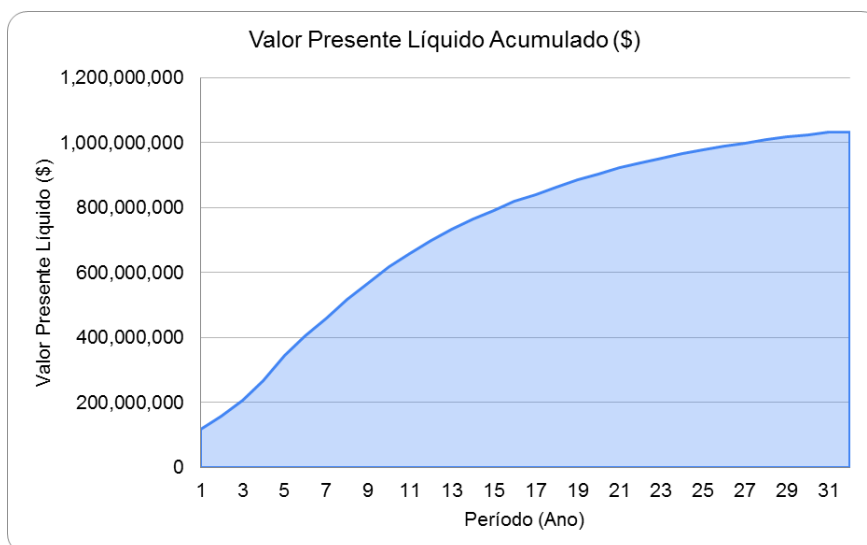
A Figura 1 apresenta o cenário base considerado ideal do ponto de vista econômico, tendo em vista que atingiu um valor de NPV considerado ótimo (1032200486 \$) e que seu crescimento não oscilou com o passar dos anos, mas que na realidade é impossível de ser reproduzido devido a oscilação na quantidade de minério produzido durante a vida útil do empreendimento. O cenário descrito na Figura 1 permite que o otimizador de cava decida qual fração do minério será lavrado para aumentar o valor econômico. Não foram inseridas obrigações de lavar a pilha de deposição inicial nos primeiros períodos, foi adotado liberdade para construção do cenário ótimo.

Figura 2 - Movimentação total de rocha (Rico + Pobre + Pilha+ Estéril).



Fonte: Autores.

Figura 3 - NPV.



Fonte: Autores.

A partir da observação do gráfico da Figura 1 vemos que a movimentação de rocha é o único dos parâmetros alcançado pelo software, sendo que está diretamente ligado a configuração desse parâmetro como obrigatório de ser obedecido. Os parâmetros de minério, material de pilha e teor não foram obedecidos. Vale dar atenção especial a movimentação de material de pilha, que além de não ser retomada durante todos os anos do empreendimento, oscila muito em cada ano na qual foi retomada.

Com a intenção de resolver o problema de retomada de pilha durante o empreendimento, formulamos um segundo cenário no qual modificamos o objetivo do

software de maximizar o NPV para obedecer a restrição de movimentação de material de pilha. Como resposta obtivemos um cenário com os dados basicamente iguais aos do primeiro cenário, sem diferenças significativas em nenhum dos resultados. Sendo assim, a partir dos cenários 01 e 02 obtivemos os dados que seriam usados como base de comparação de o que seria um cenário ideal contidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Cenário Ideal.

Duração	32 anos
NPV	1032200468 \$
Rocha	465770880 t
Minério	335008720 t
Material de Pilha	18770480 t

Fonte: Autores.

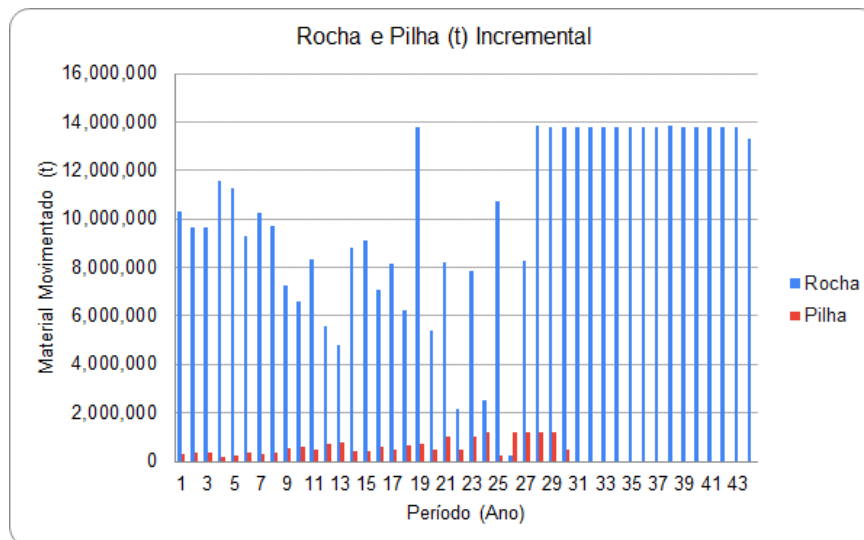
A partir desses dados foram feitas outras tentativas para tentar trazer o sequenciamento do empreendimento mais próximo a realidade.

Sabe-se que o software NPV Scheduler possui o módulo Single Mine, o qual foi utilizado para elaboração dos cenários 01 e 02, módulo esse que trabalha com a cava e a pilha juntas, mas possui também o módulo Multi Mine, que permite trabalhar com a cava e a pilha de rejeitos separadamente, como se fossem duas minas diferentes que ao final dependem uma da outra. Partindo desse princípio formulamos um terceiro cenário no qual utilizamos a mesma base de dados utilizada nos cenários anteriores, porém com algumas adaptações que permitem o trabalho com os dois ambientes individualmente. Vale citar como uma das principais alterações feitas, que ao gerar os modelos de cava final, utilizamos ao invés do algoritmo de Lerchs – Grossmann, o algoritmo de maximização de recursos nas configurações referentes a pilha. A escolha desse algoritmo se deu pelo fato de que o interesse na retomada da pilha nesse projeto não é de se conseguir a maior quantidade de lucro com sua lavra, mas sim o maior aproveitamento de seus recursos, de modo a utilizar todo seu material, sendo assim esse algoritmo se fez mais adequado.

A Figura 3 demonstra que a tentativa de trabalhar com a cava e a pilha separadamente não atingiu a qualidade do cenário base devido ao fato de haver um aumento considerável no tempo de vida do empreendimento (de 32 para 48 anos). Ocasionalmente uma queda no NPV

(78924962 \$) devido ao fato dele ser inversamente relacionado ao tempo. Observa-se na Figura 3 que a pilha não foi retomada uniformemente em todos os anos do empreendimento, sendo que esta durou apenas 30 dos 48 anos. Mesmo sendo uma melhora considerável na retomada da pilha, ainda não é viável para um empreendimento real, sendo que este último deve retomar a pilha durante todos os anos de sua vida.

Figura 4 - Movimentação de rocha e material de pilha.



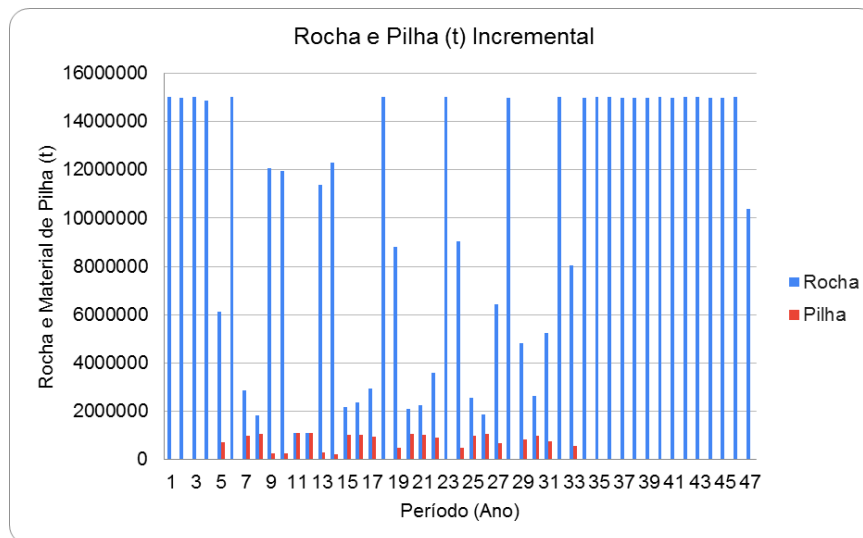
Fonte: Autores.

Após o não sucesso desse cenário, fizemos algumas observações. Ao colocar a restrição de movimentação de matéria de rocha como obrigatória no módulo Single Mine, a mesma foi obedecida com sucesso, tal sucesso é observado na Figura 1, que mostra o gráfico de crescimento de material de rocha. Tal restrição no módulo Single Mine é melhor obedecida no que no módulo Multi Mine, que configurada da mesma forma, não apresenta um comportamento de crescimento satisfatório.

A partir dessas observações foi gerado um cenário baseado no módulo Single Mine, e adicionamos a restrição de movimentação de material de pilha para os parâmetros obrigatórios (*hard constrain*) mantendo juntamente com ela a restrição de movimentação de rocha. A Figura 4 demonstra que obtivemos uma oscilação da movimentação de rocha, uma queda drástica no valor do NPV (385240507 \$) devido a um aumento de 32 para 47 anos no tempo de vida do empreendimento e ainda assim a pilha não foi retomado durante todos os anos do mesmo. Chegamos à conclusão que ao adicionar a restrição de movimentação de material de pilha juntamente com a restrição de movimentação de rocha o algoritmo do

software entrou em conflito por não encontrar uma forma de resolver as duas restrições em conjunto, e acabou por não resolver corretamente nenhuma delas.

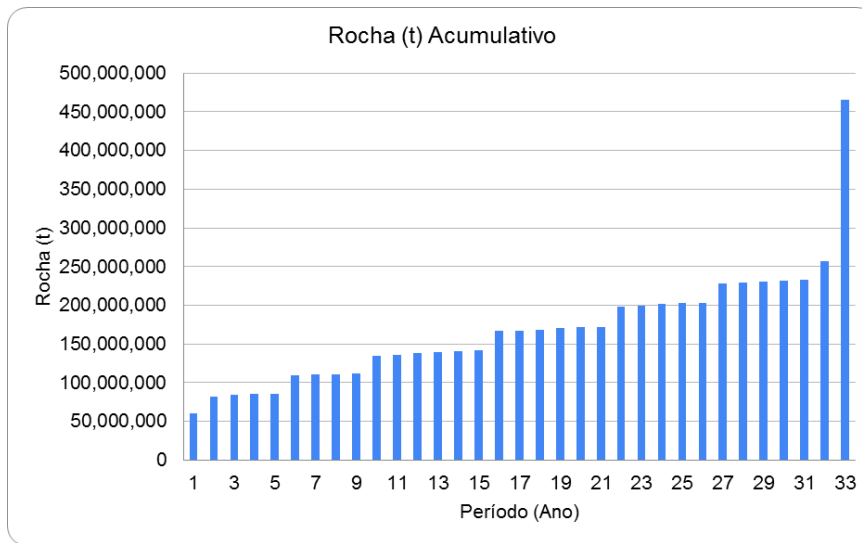
Figura 5 - Movimentação de rocha e material de pilha.



Fonte: Autores.

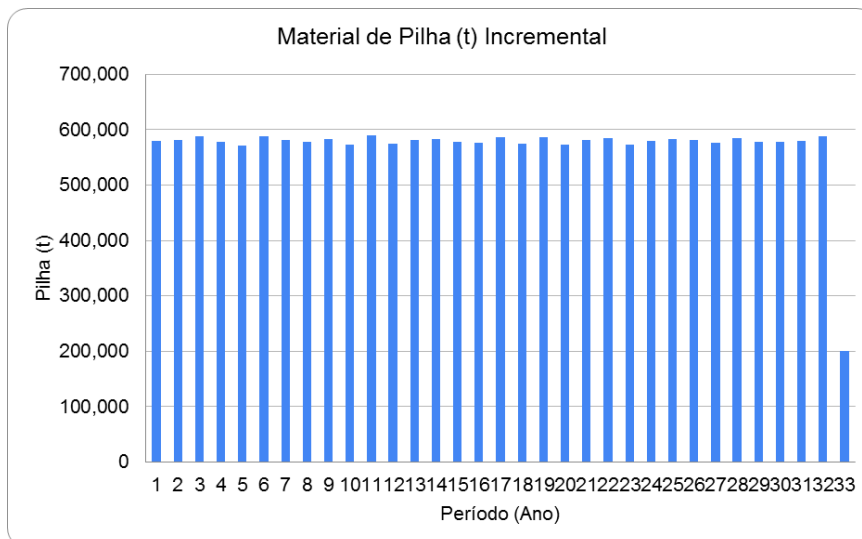
Ao final de todas as tentativas anteriores chegamos à conclusão de que, se deixássemos o software trabalhar livremente, nunca teríamos um controle total da situação. Sendo assim, após algumas observações, verificamos que seria possível fazer um controle da movimentação de material de pilha e também da movimentação de rocha, utilizando de algumas operações básicas. Para isso, pegamos os valores totais de rocha, minério e material de pilha existentes na cava final, e dividimos cada um por 32, que é o número de anos considerado ideal para a vida do empreendimento baseado no cenário escolhido como ideal. Dessa forma obtivemos a quantidade de massa que deveria ser produzida anualmente e utilizamos esses valores para formular as restrições. Como resultado as Figuras 5 e Figura 6 demonstram obtivemos uma movimentação de rocha constante durante a vida do empreendimento, sendo que nos anos finais ela teve um aumento significativo em relação aos outros anos, uma movimentação de material de pilha durante todos os anos, sendo que no último houve uma queda considerável em sua produção, e mesmo com o cenário mais próximo do ideal, sendo que o empreendimento teria 33 anos de vida, o NPV sofreu uma queda considerável comparado com o ideal (184948031 \$).

Figura 6 - Movimentação de rocha.



Fonte: Autores.

Figura 7 - Movimentação de material de pilha.



Fonte: Autores.

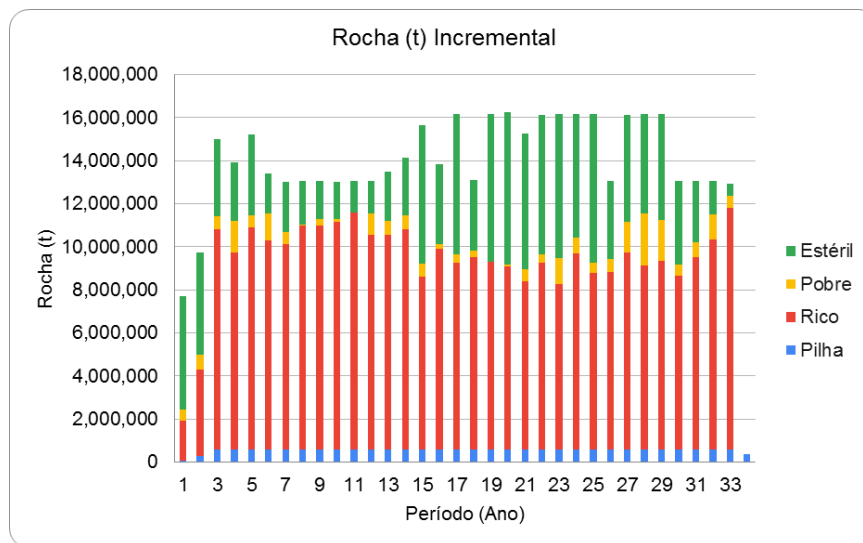
Partindo então do objetivo principal do projeto, teríamos chegado ao cenário que nos possibilitaria comparar a queda do NPV de quando se é obrigado a retomar a pilha de estéril por todos anos para quando não é. Mas algo incomodou nesse cenário devido ao aumento drástico de movimentação de rocha no último ano, a queda drástica na movimentação de material de pilha também no último ano e a oscilação, tanto como a grande oscilação na produção de minério.

Após observações minuciosas em relatórios fornecidos pelo próprio software, observamos então o principal motivo que estava ocasionando esse aumento na extração de

rocha no ano final do empreendimento. A explicação se dá pelo fato do algoritmo do NPV Scheduler reconhecer que deve cumprir as restrições aplicadas na construção de um cenário, mas para isso ele sacrifica alguns passos importantes da produção, podendo destacar assim o decaimento. O software estava fazendo o sequenciamento da seguinte forma: ele atacava todas as frentes que tinham minério liberado primeiro, não garantindo assim que no ano seguinte teria material liberado para alimentar a usina no começo do período. Dessa forma ele começava a vida do empreendimento extraindo grandes quantidades de minério, mas que ao longo de sua vida oscilavam muito, podendo chegar a quantidades muito baixas, que ao final somadas não conseguiriam cumprir as restrições exigidas pelo cenário. Para isso no último ano ele aumentou consideravelmente sua produção, o que na realidade não é algo viável de se fazer. Fazia-se então necessário controlar o sequenciamento, de forma que o software tivesse a permissão de produzir menos minério no início do empreendimento, visando também a retirada de estéril das frentes, para assim ter material liberado no começo de todos os períodos para a alimentação da usina.

Para isso, retomamos a utilização do módulo Multi Mine do software, que nos permitiu utilizar de uma técnica denominada *Pré Striping*, que consiste em retardar a produção de minério no começo do empreendimento, garantindo assim que em anos posteriores sempre existam frentes liberadas para extração e alimentação da usina. Após aplicar esse método e obter o cenário final tivemos uma surpresa. Como o objetivo do projeto era comparar a perda de NPV de um cenário no qual não se é obrigado a retomar a pilha de rejeitos para um cenário no qual isso é obrigatório, esperávamos que o NPV do último cenário utilizado para comparação com o ideal fosse menor, mas ao contrário disso, depois de fazer todas as alterações possíveis para viabilizar e trazer a realidade o cenário considerado ideal, observamos um ligeiro aumento no valor do seu NPV (de 1032200486 \$ para 1046987697 \$) mantendo o mesmo padrão de crescimento do primeiro cenário. A Figura 7 demonstra que a técnica de *Pré Striping* com Multi Mine gerou menores flutuações de massa lavrada quando comparado aos cenários anteriores.

Figura 8 - Movimentação total de rocha (Rico + Pobre + Pilha + Estéril).



Fonte: Autores.

5. Conclusão

Ao final desse projeto, com base nos dados obtidos durante a realização do mesmo, podemos extrair algumas conclusões. Em relação a escolha da cava que foi utilizada para realização do sequenciamento, foram feitas observações em gráficos gerados pelo software como os de movimentação do material da pilha de rejeitos, rocha movimentada da cava, ganhos relacionados a movimentação de material e gastos com extração e processamento, e escolhemos a cava que viria a representar o menor risco financeiro ao empreendimento, pois a escolhida poderia ter uma maior quantidade de material para extração, gerando assim um maior ganho devido a quantidade de massa movimentada, mas poderia ocasionar também uma maior quantidade de gastos com extração e processamento. Fica claro, portanto, que a escolha de uma cava com dimensões diferentes, geraria resultados finais com tendências diferentes.

Sobre a utilização do software NPV Scheduler, constatamos um sério problema durante a realização do sequenciamento para promover a estacionalização de massas, mas que após algumas observações, foram facilmente contornadas usando para isso cálculos manuais simples para fazer o controle do tempo de vida do empreendimento e a técnica do *pré stripping* para fazer o controle das massas lavradas. Por fim, ao observar os resultados obtidos com o sequenciamento último cenário, obtivemos uma surpresa ao ver que houve um ligeiro aumento no Valor presente Líquido do empreendimento, o que ocasionou um leve aumento na receita do mesmo. Observando também a tendência dos gráficos de cenários

anteriores, inferimos que, seguindo o mesmo projeto, mas utilizando uma cava diferente com dimensões maiores, esse aumento se transforma em uma queda gradual, proporcional a quantidade de massa retirada da pilha.

Sendo assim, concluímos que ao utilizar a pilha de rejeitos de uma mina como fonte de material para alimentação da usina de beneficiamento, em conjunto com o material proveniente da cava, a queda nos lucros da mesma pode não ser tão significativa quanto o esperado.

Futuramente deve ser realizado o mesmo trabalho considerando cenários probabilísticos com base na teoria de opções reais. Pois esta metodologia será capaz de incorporar todas as incertezas provenientes das atividades mineiras.

Referências

Asad, M. W. A. (2005). *Cutoff Grade Optimization Algorithm with Stockpiling Option for Open Pit Mining Operations of Two Economic Minerals*. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 19(3), 176–87. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13895260500258661>.

Burgarelli, H. R., et al. (2018). *Direct Block Scheduling under Marketing Uncertainties*. REM 71(2): 275–80.

Hustrulid, W. A & Michael, K. M & Dirk, J. A. V. Z. (2001). *Slope Stability in Surface Mining*.

Kennedy, A. (1990). *Surface Mining, Second Edition*. https://www.amazon.ca/Surface-Mining-Second-Edition-Kennedy/dp/0873351029/183-0026989-8939665?ie=UTF8&*Version*=1&*entries*=0.

Lerchs, H. & Grossmann, L. F. (1965). *Optimum Design of Open Pit Mines*. Canadian Mining and Metallurgical Bulletin v. LXVIII: 17-24.

Mathieson, G. A. (1982). *Open Pit Sequencing and Scheduling*. Presented at the First International SME-AIME Fall Meeting 82: 368.

Mohammad, W. A. & Khan, M. N. (2003). *Management of Open Pit Mining Operations with Ore Stockpiles*. J. Eng. Appl. Sci 22: 81–87.

Montiel, L. & Roussos, D. (2015). *Optimizing Mining Complexes with Multiple Processing and Transportation Alternatives: An Uncertainty-Based Approach*. European Journal of Operational Research 247(1): 166–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.002>.

Noronha, R. A. & Gripp, A. H. (2001). *Definição e Seleção de Projeto de Cava Final Em Mineração de Ferro*. Brasil Mining Site. <https://brasilminingsite.com.br/>.

Orman, Marc, Rich Peevers, and Kristin Sample. (2011). *Waste Piles and Dumps*. SME Mining Engineering Handbook: 667–80.

Burak, O. & Kumral, M. (2019). *A System-Wide Approach to Minimize the Operational Cost of Bench Production in Open-Cast Mining Operations*. International Journal of Coal Science & Technology 6(1): 84–94. <http://link.springer.com/10.1007/s40789-018-0234-1>.

Randolph, M. (2011). *Current Trends in Mining*. SME Mining Engineering Handbook: 11–19.

Souza, F. R. et al. (2018). *Direct Block Scheduling Technology: Analysis of Avidity*. REM - International Engineering Journal 71(1): 97–104. http://www.scielo.br/sciel o.php?script=sci_arttext&pid=S2448-167X2018000100097&lng=en&tlng=en.

Souza, F. R. & Melo, M. (2014). *Mining*. REM 67(4): 389–95.

Pereira, Adriana Soares, Dorlivete Moreira Shitsuka, Fabio José Parreira, and Ricardo Shitsuka. (2018). *Metodologia da Pesquisa Científica Método Qualitativo, Quantitativo Ou Quali-Quanti*. https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.

Tuck, C. (2020). *Iron Ore 1*. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 1(703): 88–89. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-iron-ore.pdf>.

Whittle, D. (2016). *Geovia Whittle Simultaneous Optimization*.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Paulo Henrique Magalhães Silva – 35%

Mateus dos Anjos Silva – 35%

Felipe Ribeiro Souza – 30%