



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



BERNARDO OLIVEIRA MOREIRA

VIABILIDADE ECONÔMICA DE LAVRA DE EMPILHAMENTO DRENADO

Ouro Preto  
2021

BERNARDO OLIVEIRA MOREIRA

VIABILIDADE ECONÔMICA DE LAVRA DE EMPILHAMENTO DRENADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas, da UFOP, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas

Orientador: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M838v Moreira, Bernardo Oliveira.

Viabilidade econômica de lavra de empilhamento drenado.  
[manuscrito] / Bernardo Oliveira Moreira. - 2021.  
47 f.: il.: color., gráf., tab.. + fórm..

Orientador: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e mineração. 2. Planejamento de lavra. 3. Valor presente líquido. I. Souza, Felipe Ribeiro. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.013

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



---

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao décimo terceiro dia do mês de Novembro de 2021, às 18h30min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Bernardo Oliveira Moreira**, matrícula 16.1.1123, intitulado: **VIABILIDADE ECONÔMICA DE EMPILHAMENTO DRENADO**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza, Me. Tiago Mozart Gonçalves Leite, Eng.<sup>a</sup> Minas Bárbara Isabela da Silva Campos. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu à discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Me. Tiago Mozart Gonçalves Leite e em último, o Eng.<sup>a</sup> Minas Bárbara Isabela da Silva Campos. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou à discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão da discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovada por unanimidade, com a nota 7,5 (Sete e meio), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. A discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 13 de Novembro de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza

Membro: , Me. Tiago Mozart Gonçalves Leite

Membro: Eng.<sup>a</sup> Minas Bárbara Isabela da Silva Campos

Dedico este trabalho especialmente à minha mãe e a meu pai (saudades eternas! Sua lembrança me inspira sempre. Obrigado por tudo!). Amo vocês!

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos em minha vida.

À minha mãe por todos os ensinamentos, cuidados, amor, força em todos os momentos de nossas vidas e por tudo que faz por mim sempre com muito amor.

Ao meu pai (eterno) por tudo que me ensinou e por tudo que fez por mim para que esse momento fosse possível. Saudades eternas! Ass.: seu guri.

Às minhas irmãs pelo carinho.

À Thayná pelo amor, carinho, companheirismo, paciência, apoio, cuidado e por estar sempre ao meu lado.

Ao César que me acolheu como um filho de sangue.

À minha tia Denise que sempre fez tudo possível para que esse sonho se realizasse e à TODA minha família, em especial à avó Terezinha e ao avô Dorival, pelo apoio e carinho.

A todos meus amigos, em especial ao elenco do Divino, por todos os momentos de parceria, apoio, risadas e alegria que ajudaram a fazer tudo mais fácil.

A todos os professores da Universidade Federal de Ouro Preto, pelos ensinamentos

Ao meu orientador Felipe Ribeiro Souza pelo incentivo, ensinamentos e paciência durante essa jornada.

Muitíssimo obrigado a todos!

"Senhor, dai-me força para mudar o que pode ser mudado, resignação para aceitar o que não pode ser mudado e sabedoria para distinguir uma coisa da outra." (São Francisco de Assis)

## RESUMO

A mineração sempre foi uma atividade de alta importância e valor para o Estado brasileiro e tem Minas Gerais como um símbolo, com exploração de recursos minerais desde o século XVII, com o início da corrida do ouro. Contudo, nas últimas décadas desde a de 1970 o movimento que se tem é o de redução da qualidade dos minérios disponíveis na natureza, levando à chamada Terceira Onda da Mineração, a qual consiste justamente na exploração de materiais mais pobres, provenientes de rochas, pilhas de estéril e empilhamentos drenados. Com isso, a mineração enfrenta em seu horizonte um grande desafio de tornar viável a lavra desses materiais, otimizando lucro e recursos, ao mesmo tempo que alinha-se às novas tendências globais de sustentabilidade. Para isso, vários estudos vêm sendo desenvolvidos nessa vertente. O propósito deste trabalho é elaborar uma metodologia de análise de empreendimentos mineiros em operação que apresente ganho financeiro em recuperar o empilhamento drenado de rejeitos. Para tal, foi usado o programa NPV *Scheduler* da *Datamine* para fazer o estudo de sequenciamentos de lavra de um empilhamento drenado e uma mina, em conjunto. Foram usados 3 modelos de blocos. Um com empilhamento drenado e mina juntos, e outros dois com o empilhamento e a mina separados. No NPV *Scheduler* foram utilizados dois modos do programa, *single mine* e *multi mine*. Com o primeiro foram executados 3 cenários distintos com o modelo de blocos unificado de pilha e mina. O primeiro cenário tinha como objetivo otimizar o Valor Presente Líquido, o segundo focava em obedecer a movimentação da pilha e por fim, o terceiro tinha como *Hard Constraint* a movimentação da pilha e não de rocha, como os dois anteriores. Por fim, o último cenário, o 4, foi executado utilizando os modelos de blocos com empilhamento e mina separados, no modo *multi mine*, com configuração similar à do terceiro cenário. Os resultados mostram uma dificuldade de realizar um sequenciamento dessa complexidade no modo *multi mine*, o qual não entregou resultados satisfatórios, aplicáveis na prática. O cenário 4, contudo, apresentou bons resultados e revelou a viabilidade do empreendimento mineiro que explore empilhamento drenado e mina simultaneamente.

**Palavras-chave:** Mineração. Sequenciamento. Planejamento. Lavra. VPL.



## ABSTRACT

Mining has always been an activity of high importance and value for the Brazilian State and has Minas Gerais as a symbol, with exploitation of mineral resources since the seventeenth century, with the beginning of the gold rush. However, in the last decades, since the 1970's, the movement has been to reduce the quality of ores available in nature, leading to the so-called Third Wave of Mining, which consists precisely in the exploitation of poorer materials, from rocks, waste piles and drained piles. With this, mining faces on its horizon a major challenge to make the mining of these materials viable, optimizing profit and resources, while aligning with the new global trends of sustainability. To this end, several studies have been developed in this area. The purpose of this work is to develop an analysis methodology for mining enterprises in operation that shows a financial gain in recovering the drained tailings pile. To do this, Datamine's NPV Scheduler program was used to study the mining scheduling of a drained stockpile and a mine, together. Three block models were used. One with a drained pile and mine together, and two with a drained pile and mine separately. In the NPV Scheduler two modes of the program were used, single mine and multi mine. With the former, 3 different scenarios were run with the unified stack and mine block model. The first scenario was aimed at optimizing the Net Present Value, the second focused on obeying the pile movement and finally, the third had as Hard Constraint the movement of the pile and not of rock, like the previous two. Finally, the last scenario, 4, was run using the block models with separate stacking and mining, in multi mine mode, with a similar configuration as the third scenario. The results show a difficulty in performing sequencing of this complexity in multi mine mode, which did not deliver satisfactory, practically applicable results. Scenario 4, however, showed good results and revealed the feasibility of mining enterprise that exploits drained stacking and mine simultaneously.

**Keywords:** Mining. Scheduling. Planning. Mining. NPV.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Esquema geral do processo de formação de rejeitos.....	15
<a href="#">Figura 2 — Detalhe do dique de partida e dreno de fundo.....</a>	17
<a href="#">Figura 3 — Exemplo de um empilhamento drenado.....</a>	17
<a href="#">Figura 4 — Pilha do Xingu.....</a>	19
<a href="#">Figura 5 — Empilhamento drenado de Monjolo.....</a>	20
<a href="#">Figura 6 — Esquema da metodologia tradicional.....</a>	21
<a href="#">Figura 7 — Modelo de blocos mina e empilhamento.....</a>	22
<a href="#">Figura 8 — Modelo de blocos empilhamento.....</a>	23
<a href="#">Figura 9 — Modelo de blocos mina.....</a>	23
<a href="#">Figura 10 — Gráfico VPL v. Pushback – Singlemine.....</a>	30
<a href="#">Figura 11 — VPL v. Pushbacks - Multi mine.....</a>	31
<a href="#">Figura 12 — Comparação financeira entre cenários 1 e 2.....</a>	31
<a href="#">Figura 13 — Movimentação de material do cenário 2.....</a>	32
<a href="#">Figura 14 — Resultados financeiros do cenário 3.....</a>	33
<a href="#">Figura 15 — VPL x Mov. Rocha dos cenários 2 e 3.....</a>	34
<a href="#">Figura 16 — Movimentação de material cenário 3.....</a>	35
<a href="#">Figura 17 — Comparação de movimentação de pilha entre cenários 2 e 3.....</a>	35
<a href="#">Figura 18 — Resultados financeiro do cenário 4.....</a>	37
<a href="#">Figura 19 — Movimentação de material do cenário 4.....</a>	37
<a href="#">Figura 20 — Comparação VPL x Mov. de Rocha dos cenários 2 e 4.....</a>	38
<a href="#">Figura 21 — Comparação da movimentação das pilhas entre cenários 2 e 4.....</a>	39
<a href="#">Figura 22 — Movimentação de pilha cenários 3 e 4.....</a>	40
<a href="#">Figura 23 — Comparação VPL vs. Rocha entre cenários 3 e 4 (Multi mine).....</a>	40
Figura 24 — Comparação financeira entre os quatro cenários.....	41

## LISTA DE EQUAÇÕES

<a href="#">Equação 1 - Recuperação mássica</a> .....	24
---	----

## LISTA DE TABELAS

<a href="#">Tabela 1 — Faixa de variação dos principais componentes químicos dos rejeitos</a> .....	20
<a href="#">Tabela 2 — Importação de dados</a> .....	25
<a href="#">Tabela 3 — Parâmetros econômicos</a> .....	25
<a href="#">Tabela 4 — Parâmetros do cenário 1</a> .....	27
<a href="#">Tabela 5 — Parâmetros do cenário 2</a> .....	27
<a href="#">Tabela 6 — Parâmetros do cenário 3</a> .....	28
<a href="#">Tabela 7 — Parâmetros do cenário 4</a> .....	29

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
2.1	OBJETIVO GERAL .....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
3.1	REJEITOS NA MINERAÇÃO .....	15
3.2	EMPILHAMENTOS DRENADOS .....	16
3.3	O HISTÓRICO DO MINÉRIO DE FERRO E OS EMPILHAMENTOS DRENADOS .....	18
3.4	PLANEJAMENTO DE LAVRA DE MINAS .....	20
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	22
4.1	BASE DE DADOS .....	22
4.2	DETERMINAÇÃO DOS PRODUTOS .....	23
4.3	CARACTERÍSTICA DO MODELO .....	24
4.4	MODELO ECONÔMICO .....	25
4.5	OTIMIZAÇÃO DA CAVA FINAL .....	26
4.6	AVANÇOS .....	26
4.7	SEQUENCIAMENTO DE LAVRA .....	26
4.7.1	<b>Cenário 1</b> .....	27
4.7.2	<b>Cenário 2</b> .....	27
4.7.3	<b>Cenário 3</b> .....	28
4.7.4	<b>Cenário 4</b> .....	28
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	30
5.1	AVANÇOS .....	30
5.1.1	<i>Single Mine</i> .....	30
5.1.2	<i>Multi Mine</i> .....	30
5.2	CENÁRIO 2 E SEUS RESULTADOS .....	31
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS 2 E 3.....	33
5.4	MOVIMENTAÇÕES E VPL DO CENÁRIO 4.....	36
5.5	CENÁRIO 2 X CENÁRIO 4.....	38
5.6	CENÁRIO 4 X CENÁRIO 3.....	39
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	42
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	44

## 1 INTRODUÇÃO

Durante o ano de 2020, o setor mineral foi responsável por cerca de 2,5% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, com faturamento na casa dos R\$200 bilhões de reais, segundo o Governo Do Brasil (2021). Grande parte dessa riqueza gerada vem dos minérios de ferro, elemento do qual estima-se que o Brasil possua 17 bilhões de toneladas em reserva (Parejo). Além disso, foi o terceiro produto mais exportado pelo país no ano de 2020 (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2021).

A região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, é uma das principais fornecedoras desse minério, com elevados teores de Ferro, caracterizando como um minério rico e muito lucrativo (Carvalho *et al.*, 2014). Contudo, a exploração desses produtos mais ricos, com mais de 60% de Ferro em sua composição, que se deu desde o século XVIII, nas últimas décadas presenciou uma queda devido à escassez desse bem, levando à mineração de minérios de ferro mais pobres, como os itabiríticos, segundo Alves (2015).

Desde então, o grande desafio da mineração passou a ser o aproveitamento desses minérios com teores mais baixos, na chamada “Terceira Onda da Mineração”. Esses minérios são oriundos de camadas do subsolo, pilhas de estéril, barragens de rejeito e até mesmo empilhamentos drenados (Alves, 2015).

A partir da década de 1970 foram construídas várias estruturas para a contenção de rejeitos de mineração de minério de ferro os quais, à época, não podiam ser processados (Sousa e Gomes, 2018). Sendo assim, os materiais contidos nessas estruturas possuem teores próximos ou até mesmo superiores aos encontrados em algumas minas ativas, se tornando uma grande fonte de produção e geração de riqueza através dos produtos contidos nessas estruturas.

A Vale anunciou, a partir de 2013, um projeto com investimento de US\$5,5 bilhões de dólares para beneficiar itabiritos compactos com até 40% de teor de Ferro (Vale, 2013). Diversos estudos foram feitos visando uma melhor compreensão de estruturas citadas acima como barragens de rejeitos e empilhamentos drenados, e podem representar fontes importantes de minério para o Brasil, principalmente em um momento que se preza pela eficiência de processos e minimização de rejeitos e maximização de aproveitamentos dos recursos disponíveis.

Porém, a lavra de tais estruturas não é uma operação simples e a viabilidade do processo está sujeito a condições econômicas favoráveis devido à complexidade que envolve essas operações.

Assim sendo, neste projeto pretende-se testar a hipótese de que é viável lavar um empilhamento drenado em conjunto com a mina, contribuindo para a otimização de recursos e aproveitamento de materiais outrora descartados e que atualmente podem se tornar grandes ativos para as mineradoras.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

A proposta deste trabalho é elaborar uma metodologia de análise de empreendimentos mineiros em operação que apresente ganho financeiro em recuperar o empilhamento drenado de rejeitos. A metodologia abordada, em seu aspecto geral, irá abordar os principais fatores limitantes na operação dos empilhamentos drenados que podem comprometer ou inviabilizar o empreendimento. Serão avaliados o valor presente líquido (VPL) das alternativas, estacionalização dos teores dos produtos e contaminantes, homogeneidade das massas e produções.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Executar cenários de planejamento com diferentes situações utilizando uma base de dados unificada com mina e empilhamento drenado;
- Executar cenário de planejamento utilizando uma base de dados composta por um empilhamento drenado e uma mina;
- Analisar e comparar os dados gerados buscando o entendimento e a proposta de um cenário aplicável.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 REJEITOS NA MINERAÇÃO

Araujo (2006) define os rejeitos de mineração como materiais resultantes dos processos químicos e físicos sofridos pelos materiais explorados da mina. Esses rejeitos apresentam características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis, em função do tipo de minério e processo de beneficiamento aos quais são submetidos. Estes possuem, geralmente, granulometria fina e nos casos dos rejeitos de minério de ferro, a densidade depende da quantidade do elemento ferro na composição dos rejeitos (Presotti, 2002).

Presotti (2002) elaborou um esquema que ilustra o processo de formação dos rejeitos de mineração, conforme Figura 1.

Figura 1 — Esquema geral do processo de formação de rejeitos



Fonte: Presotti (2002)

Durante muitos anos esses materiais foram considerados sem valor devido a dificuldades técnicas e tecnológicas que compensassem financeiramente o seu aproveitamento. Contudo, nos dias atuais, existe a possibilidade de utilizar rejeitos de minério de ferro na fabricação e no desenvolvimento de diversos novos produtos para várias indústrias diferentes, como cerâmica e até mesmo siderurgia, segundo Wolff (2009). Dessa forma, o estudo desses materiais e das estruturas que os contêm ganham força.

### 3.2 EMPILHAMENTOS DRENADOS

Após os rompimentos das barragens de Fundão e Barragem 1, em Mariana-MG e Brumadinho-MG, respectivamente, o uso dessas estruturas ganhou destaque. Foram levantadas questões referentes à segurança e à própria utilização das mesmas, o que levou até mesmo a proibição da construção de barragens pelo método de alteamento a montante e o descomissionamento das já existentes. Desta forma, a busca por outros métodos de disposição de rejeitos, como os empilhamentos drenados, ganha força e se torna uma tendência para o futuro. E na busca por garantir a segurança de estruturas de contenção de rejeitos antigas, o aproveitamento econômico das mesmas também se torna um ponto de atenção.

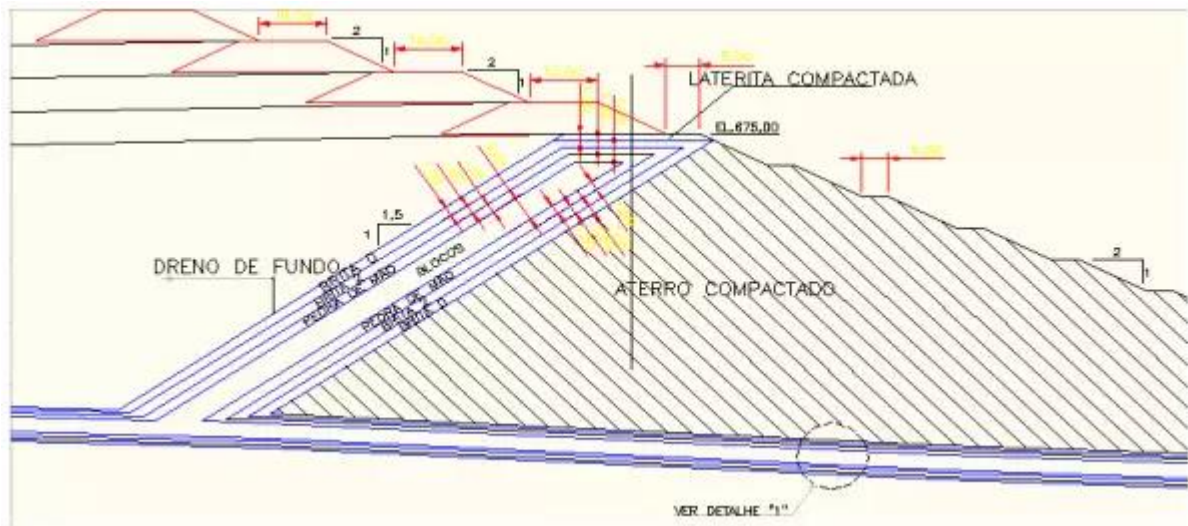
Segundo Ministério de Minas e Energia (2019), empilhamentos drenados são estruturas construídas mecânica ou hidráulicamente com rejeitos de mineração que se configuram como um maciço permeável e dotado com um sistema de drenagem de fundo.

Essa técnica de disposição de rejeitos é característica de rejeitos arenosos (Alves, 2015), por possuírem um coeficiente de permeabilidade que permita um fluxo de drenagem gravitacional no interior do aterro, não sendo indicado, portanto, para rejeitos finos (Alves, 2020). Segundo Gomes (2009), o sistema tem ainda por característica inibir o acúmulo de água no interior da estrutura, por isso, podem ser instalados extravasores e sistemas de captação de água, a fim de possibilitar a rápida remoção de água em períodos com maior nível de pluviosidade.

A forma com que o processo da formação desses empilhamentos é realizado, é semelhante aos alteamentos à montante de barragens, estando a diferença na granulometria dos materiais envolvidos. Os rejeitos são transportados sob a forma de polpa e depositados pela técnica de aterro hidráulico (Gomes, 2009). A técnica de aterro hidráulico, por viabilizar a construção de alteamentos sucessivos, de acordo com as produções de minério, oferece às mineradoras a oportunidade de distribuir o investimento ao longo da vida útil da estrutura (Milonas, 2006).

A preparação para a construção da estrutura envolve a construção de um dique de partida e um sistema de drenagem interna, conforme figura 2, o qual consiste em drenos executados na fundação do reservatório (Alves, 2015).

Figura 2 — Detalhe do dique de partida e dreno de fundo



Fonte: Gomes (2009)

A partir da crista do dique de partida é feito o lançamento inicial, por meio de um ou vários pontos de descarga. Em sequência, vários alteamentos sucessivos são construídos sobre os rejeitos previamente depositados, até que a altura máxima seja atingida (Gomes, 2009). Na figura 3, têm-se um exemplo de um empilhamento drenado.

Figura 3 — Exemplo de um empilhamento drenado



Fonte: Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) (2016)

Essa metodologia de disposição de rejeitos possui inúmeras vantagens, como o aproveitamento de encostas para sua construção, economizando espaço e gastos com estrutura. Outro fator chave é a segurança dessas estruturas por não reterem água, sendo geotecnica-

mais estáveis. A utilização de rejeitos desaguados ainda permite a maximização do aproveitamento de águas, podendo reaproveitá-la dentro as operações da mina, além de gerar menor passivo ambiental, facilitar o fechamento da mina, a recuperação ambiental e visual. Como desvantagem pode ser citada a necessidade de maior controle operacional e alto custo operacional (Gomes, 2009).

### 3.3 O HISTÓRICO DO MINÉRIO DE FERRO E OS EMPILHAMENTOS DRENADOS

Segundo Rosière (1983), a região do Quadrilátero Ferrífero, importante reserva de minério de ferro, em Minas Gerais, pode ser classificada em dois grandes grupos de minérios: os hematíticos de alto teor, e considerado minério de ferro mais importante, e os itabiríticos mais heterogênicos.

Os minérios hematíticos, ou de alto teor, são produtos de metamorfismo da rocha de itabirito e esse processo pode até mesmo remover o quartzo presente no minério através de solubilização, produzindo hematitas puras. Os itabiríticos, ou quartzosos, são produtos do intemperismo da rocha homônima. Esse processo atua tanto na superfície topográfica quanto internamente (Carvalho, 2012).

De acordo com Omachi (2015), dos anos 1940 a 1960, Minas Gerais experimentou a exploração de minério de ferro baseada na hematita, na chamada primeira fase da mineração no estado. A partir da década de 1970, a escassez desses materiais levou à exploração dos itabiritos friáveis, com teores razoáveis de ferro e muito contaminantes.

Atualmente, na chamada “Terceira Onda da Mineração”, o desafio encontra-se em lavar materiais ainda mais pobres, advindos de barragens de rejeitos, pilhas de estéril, empilhamentos drenados e camadas intocados do subsolo (Alves, 2015).

Segundo Wolff (2009), os rejeitos podem apresentar um teor considerável do mineral de interesse devido a ineficiências no processo de beneficiamento, caracterizando uma baixa recuperação dos materiais. Essa ineficiência pode se dar porque os procedimentos de tratamento não foram bem executados ou até mesmo por falta de tecnologia disponível para fazer a separação entre minério e ganga, ou ainda para recuperar materiais mais finos.

Desta forma, a evolução tecnológica no processamento de minerais, abre oportunidades para exploração materiais anteriormente descartados. De acordo com Godfrey et al. (2007), ainda há outros fatores econômicos a se considerar na recuperação de rejeitos, como: o teor e o

preço do minério de interesse, custos de extração, escala de extração, eficiências de processamento, interesse e estoque global total.

Espósito (2000) realizou o estudo de caso de dois empilhamentos drenados, Manjolo e Xingu. A pilha de Xingu, Figura 4 abaixo, está localizada na mina de Alegria, em Mariana-MG e teve suas operações encerradas em novembro de 1998, após atingir sua cota máxima de 75 metros. Essa estrutura foi responsável por estocar os rejeitos de minério de ferro gerados pelo processo de concentração por flotação da usina de beneficiamento da mina em questão. Estima-se que as reservas de minério de ferro da mina superavam 800 milhões de toneladas entre hematíticos de alto teor e itabiríticos.

Figura 4 — Pilha do Xingu



Fonte: Espósito (2000)

Já a pilha de Monjolo, localizada na mina de Morro Agudo, em Rio Piracicaba-MG, foi construída com rejeitos provenientes do processo de concentração por espirais da mina. A Figura 5 ilustra a pilha de Monjolo.

Figura 5 — Empilhamento drenado de Monjolo



Fonte: Alves (2015)

No estudo de caracterização desses rejeitos realizado por Espósito (2000), foram constatados valores médios para os teores de Ferro para Xingu e Monjolo de 54% e 24%, respectivamente. A Tabela 1 traz mais detalhes a respeito destes resultados.

Tabela 1 — Faixa de variação dos principais componentes químicos dos rejeitos

	Pilha do Xingu		Pilha do Monjolo	
	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)
Máximo	63,2	40,9	32,0	72,0
Mínimo	40,1	8,1	18,9	53,7
Médio	54,0	21,1	24,3	64,4
Desvio Padrão	5,5	7,9	3,6	5,2

Fonte: Espósito (2000)

Como dos dados mostram, é possível encontrar rejeitos com até 63% de Fe, caracterizando como um minério muito rico, de elevado teor. Revelando assim, oportunidades econômicas muito boas para exploração desses empilhamentos drenados.

### 3.4 PLANEJAMENTO DE LAVRA DE MINAS

O planejamento de lavra de minas é uma das etapas mais importantes de um projeto de empreendimento mineiro, pois é onde tem-se a oportunidade de minimizar custos operacionais e de investimentos, segundo Curi (2014).

O objetivo do planejamento mineiro é definir uma estratégia que otimize o investimento total (Pinto; Dutra, 2008) e o aproveitamento dos recursos minerais, maximizando sua recuperação.

Curi (2006) divide o planejamento em 4 grandes grupos:

- Características naturais e geológicas do corpo mineral, tipo do minério, distribuição espacial, topografia, hidrogeologia, características ambientais de sua localização e características metalúrgicas etc.
- Fatores econômicos: custos operacionais e de investimento, razão de produção, condições de mercado etc.
- Legais: regulamentações local, regional e nacional, política de incentivo à mineração etc.
- Fatores tecnológicos: equipamentos, ângulos de talude, altura de bancada, inclinação de rampas etc.

Campos (2017) diz que o planejamento tradicional de lavra de minas é formado por três etapas distintas, porém interligadas, sendo elas: determinação da cava final ótima, definição dos *pushbacks*, ou avanços, e por fim, a programação da produção, conforme Figura 6.

Figura 6 — Esquema da metodologia tradicional



Fonte: Adaptado de MiningMath, s.d.

Esse planejamento, contudo, é dinâmico e está sujeito a interferências até mesmo geopolíticas que podem mudar o curso da lavra. Sendo assim, é essencial que esteja sempre sendo revisado para garantir que a melhor estratégia está sendo aplicada com as condições existentes.

## 4 METODOLOGIA

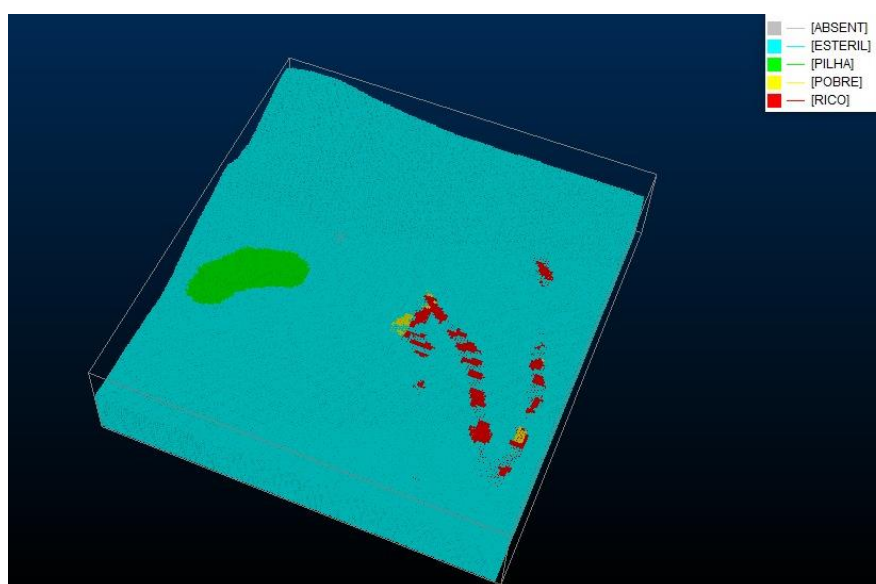
Para a realização deste projeto foram utilizados os softwares *NPV Scheduler* e *Studio OP* desenvolvidos pela *Datamine Software*, disponibilizados no Laboratório de Planejamento de Mina do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN), na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Campus Morro do Cruzeiro.

No *NPV Scheduler* foram montados e executados quatro cenários, os quais serão detalhados mais a frente, sendo três utilizando o modo *single mine*, no qual mina e empilhamento drenado estão em conjunto num único modelo de blocos, e um cenário no modo *multi mine*, no qual foram utilizados dois modelos de blocos distintos, um para o empilhamento drenado e outro para a mina.

### 4.1 BASE DE DADOS

Para a elaboração do projeto foram construídos modelos de blocos com condições distintas. Primeiramente considerando uma unificação entre pilha de rejeitos e mina, a qual foi utilizada para execução dos planejamentos no modo *Single Mine* do programa *NPV Scheduler*. A segunda continha dois modelos distintos, sendo um o da mina e outro o da pilha, visto que foram utilizados no modo *Multi Mine* do *NPV Scheduler*. Nas figuras 7, 8 e 9, podem ser melhores observados os modelos.

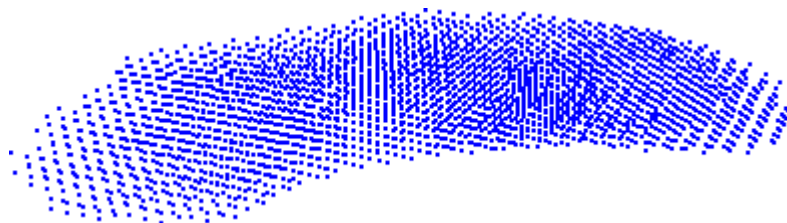
Figura 7 — Modelo de blocos mina e empilhamento



Fonte: O autor (2021)

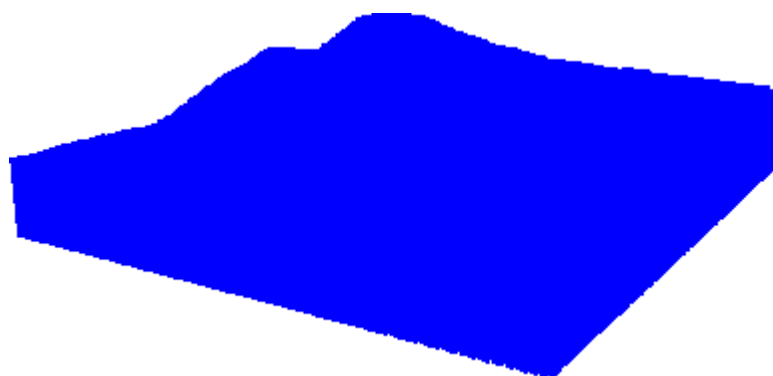


Figura 8 — Modelo de blocos empilhamento



Fonte: O autor (2021)

Figura 9 — Modelo de blocos mina



Fonte: O autor (2021)

## 4.2 DETERMINAÇÃO DOS PRODUTOS

Os produtos gerados para a realização desse sequenciamento foram denominados:

- “pilha”: provenientes do empilhamento drenado
- “sinter”: com partículas entre 6,35mm e 0,150mm (Campos Junior, 2018), proveniente da mina.
- “granulado”: com partículas entre 37,5mm e 6,35mm (Campos Junior, 2018), proveniente da mina.
- “fino”: com partículas <0,150mm, proveniente da mina.

Os campos importados para o NPV *Scheduler* foram previamente tratados com a aplicação da fórmula de recuperação mássica, conforme equação 1, assim como a partição dos produtos também já foi aplicada.

Equação 1 - Recuperação mássica

$$Y = \frac{C}{A} = \frac{(a - e)}{(c - e)}$$

Sendo, Y = recuperação mássica; C = massa do concentrado; A = massa da alimentação; a = teor da espécie i na alimentação; e = teor da espécie i no rejeito; c = teor da espécie i no concentrado.

A partição foi definida como:

- Minério rico: 25% granulado e 75% sinter
- Minério pobre: 100% finos

E ocorreu a partir do teor dos minérios de ferro, sendo:

- Estéril: <17%
- Baixo teor: 17%-36%
- Alto teor: >36%

A recuperação metalúrgica foi definida como 90%.

#### 4.3 CARACTERÍSTICA DO MODELO

Para iniciar a programação, após a seleção da base de dados foram selecionados campos chaves para execução do modelo. Sendo eles “densidade”, “tipo de rocha”, produtos, os quais foram denominados “FINOS-TO”, “GRANU-TO”, “SINTER-TO”, “PILHA-TO” e por último os elementos Fe e Si. A tabela 2 mostra os campos selecionados juntamente com suas designações, unidades e tipo de dado.

Tabela 2 — Importação de dados

Campo	Designação	Unidade	Tipo de dado
DENSIDADE	Densidade	ton/cu.m	
ROCHA	Tipo de rocha		
FINOS-TO	Produto	ton	massa
GRANU-TO	Produto	ton	massa
SINTER-TO	Produto	ton	massa
PILHA-TO	Produto	ton	massa
SiO2	Elemento	%	porcentagem

Fonte: O autor (2021)

#### 4.4 MODELO ECONÔMICO

O modelamento econômico foi construído a partir dos seguintes parâmetros com valores médios do mercado para minério de ferro. Tais dados precisam ser informados ao NPV *Scheduler*, como consta na tabela 3.

Tabela 3 — Parâmetros econômicos

Preço de Venda (\$/t de produto) – Todos os Produtos	70
Custo de Venda (\$/t de produto) – Todos os Produtos	15
Custo de lavra (\$/t de ROM) – Rocha rica e pobre	2.2
Custo de lavra (\$/t de ROM) – Pilha de Estéril	8.8
Custo de Beneficiamento (\$/t de ROM) – Rocha rica e pobre	3.85
Custo de Beneficiamento (\$/t de ROM) – Pilha	10
Recuperação Metalúrgica (%)	90
Teor do Concentrado (%)	65
Diluição (%)	0
Recuperação (%)	100

Fonte: O autor (2021)

#### 4.5 OTIMIZAÇÃO DA CAVA FINAL

Seguindo a programação do sequenciamento, o próximo passo trata da otimização da cava final, definindo parâmetros como a taxa de desconto anual de 10%, a qual se refere ao ajustamento do valor futuro de fluxo de caixa para calcular o valor atual do fluxo de caixa. O sequenciamento foi definido visando otimizar o NPV (Valor Presente Líquido, com a sigla vinda da língua inglesa traduzida), sendo esse a diferença entre o valor atual que entra em caixa subtraído do valor atual que sai em um determinado período de tempo. Para a definição dos taludes foram utilizados valores padrões definidos pelo próprio programa.

#### 4.6 AVANÇOS

Os avanços, mais conhecidos como *pushbacks*, são definidos como a progressão de lavra planejada de uma série de bancadas. Dessa forma, o limite de avanço da cava foi definido como a cava final. Ademais, o controle de avanço utilizado foi o total de minério restringido a valor de 20 milhões de toneladas e um limite de 1000 bancadas.

#### 4.7 SEQUENCIAMENTO DE LAVRA

Nesta seção, ocorrerão uma série de subdivisões para que todos os cenários e suas restrições, tanto as *hard constraints*, aquelas que devem ser obrigatoriamente seguidas pelo programa, quanto as *soft constraints*, restrições que possuem mais flexibilidade para que o programa consiga atingir a faixa de alcance estabelecida, sejam explorados sejam devidamente apresentados.

Foram montados 4 cenários distintos. Os cenários 1 e 2, construídos no *single mine*, têm como *hard* a movimentação de rocha limitada a 15 milhões de toneladas por ano. A diferença entre os dois se dá no objetivo do sequenciamento. Enquanto o primeiro tem como objetivo a maximização do Valor Presente Líquido, o segundo tem a movimentação do empilhamento como objetivo do sequenciamento.

Os cenários 3 e 4 têm como *hard constraint* a movimentação de pilha limitada a 0.86 milhão de tonelada por ano e a maximização do Valor Presente Líquido como objetivo do sequenciamento e se diferenciam pelos seus modos de execução. Enquanto o cenário 3 foi o último cenário executado no *single mine*, o 4 foi o cenário executado no modo *multi mine*.

#### 4.7.1 Cenário 1

Esse cenário foi construído usando a base de dados unificada no *single mine* e teve como parâmetros os dados exibidos na tabela 4.

Tabela 4 — Parâmetros do cenário 1

<i>HARD CONSTRAINT</i>			
Rocha (Mt)	15		
<i>SOFT CONSTRAINT</i>			
	Meta	Mínimo	Máximo
Movimentação de Pilha + Rico + Pobre (Mt)	12	10	14
Teor Alimentação Usina (%)	35	30	70
Movimentação Pilha (Mt)	1.2	0.5	1.5
Objetivo Sequenciamento	Maximizar NPV		

Fonte: O autor (2021)

Esses valores e restrições foram definidos visando a estacionalização do planejamento a curto prazo a fim de manter-se uma constância na produção para tanto usina quanto operação de mina tivessem capacidade de planejar suas atividades.

#### 4.7.2 Cenário 2

Esse cenário foi construído também usando a base de dados unificada no *single mine* e teve como parâmetros os dados que constam na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 — Parâmetros do cenário 2

<i>HARD CONSTRAINT</i>			
Rocha (Mt)	15		
<i>SOFT CONSTRAINT</i>			
	Meta	Mínimo	Máximo
Movimentação de Pilha + Rico + Pobre (Mt)	12	10	14
Teor Alimentação Usina (%)	35	30	70
Movimentação Pilha (Mt)	1.2	0.5	1.5
Objetivo Sequenciamento	Obedecer a movimentação da pilha		

Fonte: O autor (2021)

Ao contrário do cenário 1, o qual teve como objetivo do sequenciamento a maximização do Valor Presente Líquido, esse cenário buscou um sequenciamento voltado para a obediência da movimentação da pilha, com o objetivo otimizar esse valor.

#### 4.7.3 Cenário 3

Esse cenário foi construído também usando a base de dados unificada no single mine e teve como parâmetros os dados da tabela 6 abaixo.

Tabela 6 — Parâmetros do cenário 3

<i>HARD CONSTRAINT</i>			
Movimentação da pilha (Mt)	0.86		
<i>SOFT CONSTRAINT</i>			
	Meta	Mínimo	Máximo
Movimentação de Pilha + Rico + Pobre (Mt)	14.5	14	16
Teor Alimentação Usina (%)	35	30	70
Movimentação Pilha (Mt)	1.2	0.5	1.5
Movimentação de minério do primeiro ano (Mt)	-	-	1.8
Movimentação de minério do restante do empreendimento(Mt)	6.8	6	7.8
Objetivo Sequenciamento	Maximizar NPV		

Fonte: O autor (2021)

Nesse cenário, foram adotados diferentes parâmetros visando uma maior constância nos valores de movimentação de minério e de alimentação da mina.

#### 4.7.4 Cenário 4

Este cenário foi construído usando a base com os dois modelos de blocos, da mina e da pilha, separados e foi executado no módulo *multi mine* do programa NPV Scheduler.

Tabela 7 — Parâmetros do cenário 4

<i>HARD CONSTRAINT</i>			
Movimentação da pilha (Mt)	0.86		
<i>SOFT CONSTRAINT</i>			
	Meta	Mínimo	Máximo
Movimentação de Pilha + Rico + Pobre (Mt)	14.5	14	16
Teor Alimentação Usina (%)	35	30	70
Movimentação Pilha (Mt)	1.2	0.5	1.5
Movimentação de minério do primeiro ano (Mt)	-	-	1.8
Movimentação de minério do restante do empreendimento(Mt)	6.8	6	7.8
Objetivo Sequenciamento	Maximizar NPV		

Fonte: O autor (2021)

O cenário 4 adotou os mesmos parâmetros do cenário 3 visando a estacionalização da produção e para fim de comparação entre os dois modos de execução do NPV *Scheduler* aqui tratados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

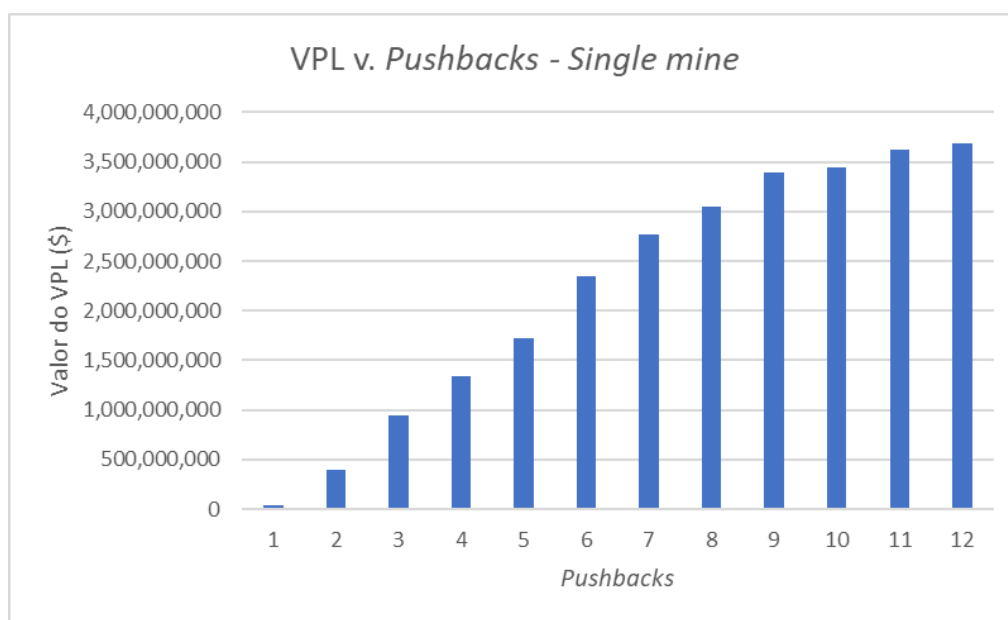
Neste tópico serão apresentados os resultados referentes aos cenários executados a partir da metodologia apresentada. A análise dos resultados terá ênfase nos aspectos financeiro e nas movimentações de minério e estéril conforme restrições apresentadas na metodologia.

### 5.1 AVANÇOS

#### 5.1.1 *Single mine*

O relatório de *pushbacks* deste modo gerou o gráfico abaixo, e como pode se observar, há um aumento do VPL à medida que os *pushbacks* se desenvolvem, justificando a escolha pelo limite final.

Figura 10 — Gráfico VPL v. *Pushback* – *Singlemine*

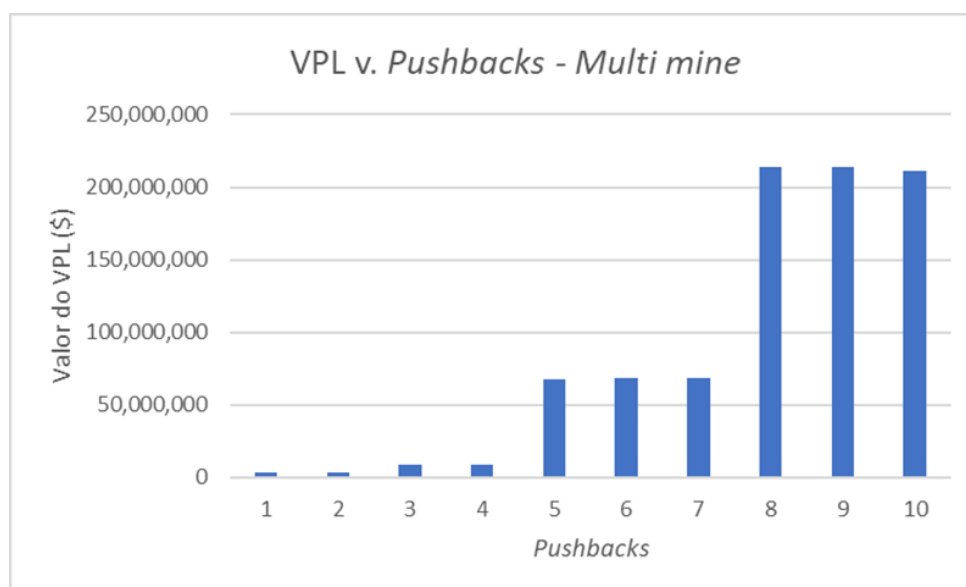


Fonte: O autor (2021)

#### 5.1.2 *Multi mine*

Os dados dos relatórios de *pushbacks* do modo *multi mine* também revelam um aumento do NPV, à medida que os avanços se desenvolvem, levando a escolha da cava final.



Figura 11 — VPL v. *Pushbacks* - *Multi mine*

Fonte: O autor (2021)

## 5.2 CENÁRIO 2 E SEUS RESULTADOS

O cenário 2, cujos parâmetros foram descritos na tabela 5, se aproxima bastante do cenário 1, tabela 4, sendo ambos construídos utilizando a base de dados unificada no modo single mine do NPV *Scheduler* e com a movimentação de rocha como *hard constraint*, que deve ser obedecida.

A diferença entre os dois consiste no objetivo do sequenciamento. Enquanto o cenário 1 busca maximizar os valores do Valor Presente Líquido (VPL), o 2 buscar obedecer a movimentação da pilha. Os resultados produzidos por ambos foram idênticos, conforme figura 12.

Figura 12 — Comparação financeira entre cenários 1 e 2

SINGLE MINE	Ano	Rocha [ton]	Receita	Custo de processamento	Custo de lavra	Custos de capital	VPL
CENÁRIO 1	28	407,308,320.00	R\$ 6,530,852,423.00	R\$ 891,183,490.00	R\$ 1,062,286,896.00	R\$ -	R\$ 1,916,492,488.00
CENÁRIO 2	28	407,308,320.00	R\$ 6,530,852,423.00	R\$ 891,183,490.00	R\$ 1,062,286,896.00	R\$ -	R\$ 1,916,492,488.00
CENÁRIO 3	29	407,308,320.00	R\$ 6,530,852,423.00	R\$ 891,183,490.00	R\$ 1,062,286,896.00	R\$ -	R\$ 941,310,365.00

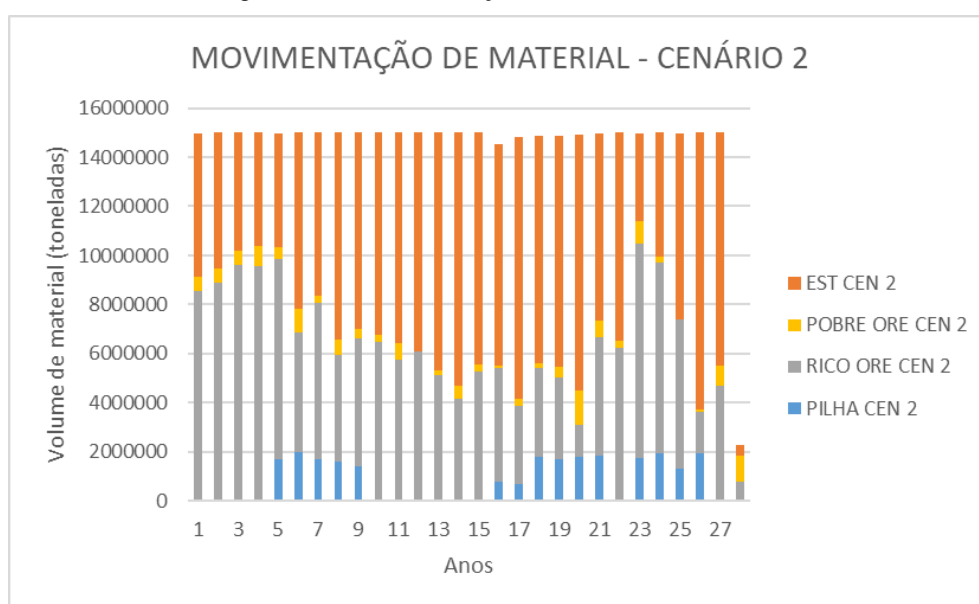
Fonte: O autor (2021)

Como os resultados obtidos são idênticos, gerando um sequenciamento de 28 anos para a mina com VPL de R\$1,9 trilhão, e o objetivo é que a pilha seja lavrada em conjunto com a mina, para fins de comparação o cenário 2 foi escolhido como ideal, por ter a movimentação da pilha como objetivo do sequenciamento.

Vale frisar que a escolha deste cenário como ideal é, na verdade, o melhor cenário de lavra possível. Visto que possibilita a lavra do material do empilhamento drenado, rejeitado por uma operação de lavra anterior, com o da mina atual. Porém, o sequenciamento é realizado em conjunto, como se fosse um projeto unificado, com características semelhantes, quando na verdade, cada um possui suas particularidades como equipamentos e geometrias diferentes. Esta simplificação do cenário 2 contribui para que seu VPL seja tão alto, enquanto outros cenários discutidos posteriormente não têm esse VPL como valor palpável.

A seguir, na figura 13, é apresentado o gráfico de movimentação de material do cenário 2 e discutido seus resultados.

Figura 13 — Movimentação de material do cenário 2



Fonte: O autor (2021)

Observa-se que a quantidade de minério rico movimentado nos anos iniciais do projeto é bastante alta e a quantidade de estéril segue um movimento inversamente proporcional. Isso se deve à preferência do algoritmo de lavar os materiais mais ricos primeiros para obter maior retorno nos anos iniciais devido ao efeito que a penalidade da taxa de desconto impõe ao valor do retorno financeiro com o tempo.

A movimentação da pilha é inconstante, evidenciando que por mais que traga bons resultados, principalmente financeiramente, operacionalmente ainda há aspectos a serem melhorados. Essas retomadas na pilha em anos específicos podem se dar a fim de cumprir a meta de qualidade de minério entregue a usina, fazendo com esses materiais sejam usados para blendagem para compor o minério alimentado na planta de processamento da usina.

### 5.3 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS 2 E 3

O cenário 3 também foi montado usando a base de dados unificada no modo single mine e seus parâmetros foram descritos na tabela 6.

Este cenário, ao contrário dos dois anteriores, foi construído usando a movimentação da pilha como *hard constraint*, aquela que deve ser cumprida pelo programa, e o objetivo do sequenciamento foi maximizar o VPL.

Inicialmente esse cenário tinha como *hard constraints* as movimentações de rocha, limitada a 15 (quinze) milhões de toneladas e de minério da pilha, limitada a 1,2 milhão de tonelada. Entretanto, essas restrições impediram que o cenário executasse de forma adequada, gerando operações durante mais de 80 anos, tornando totalmente inviável o empreendimento quando comparado com os cenários anteriores. Por isso a restrição referente a movimentação de rocha foi retirada e de minério de pilha alterada para 0,86 milhão de tonelada. A origem deste valor de minério da pilha está ligada ao valor total de toneladas de minério dividido por 28, valor este que se refere ao número de anos desejado que o empreendimento tenha, buscando equidade com o cenário ideal.

As movimentações de minério contudo, continuaram bastante variáveis, e foi nesse momento que foi inserido a *soft constraint* que buscou o controle desse dado. Os resultados, porém, não foram muito satisfatórios. Grandes volumes de estéril eram retirados como forma de liberar minério para alimentar a usina, porém, quando estes minérios se esgotavam, enormes quantidades de estéril eram lavradas novamente, com o fornecimento de minério para usina oscilando fortemente, algo longe de ser desejável.

Na tentativa de solucionar essa questão, foi adotado o pré-capeamento, a remoção exclusiva de estéril durante o primeiro período anual, com a intenção de liberar minério para a lavra e para alimentar a usina com valores mais constantes.

Estes problemas evidentemente se refletiram no resultado financeiro do cenário, o qual teve o pior desempenho dentro todos estudados. Os resultados estão abaixo.

Figura 14 — Resultados financeiros do cenário 3

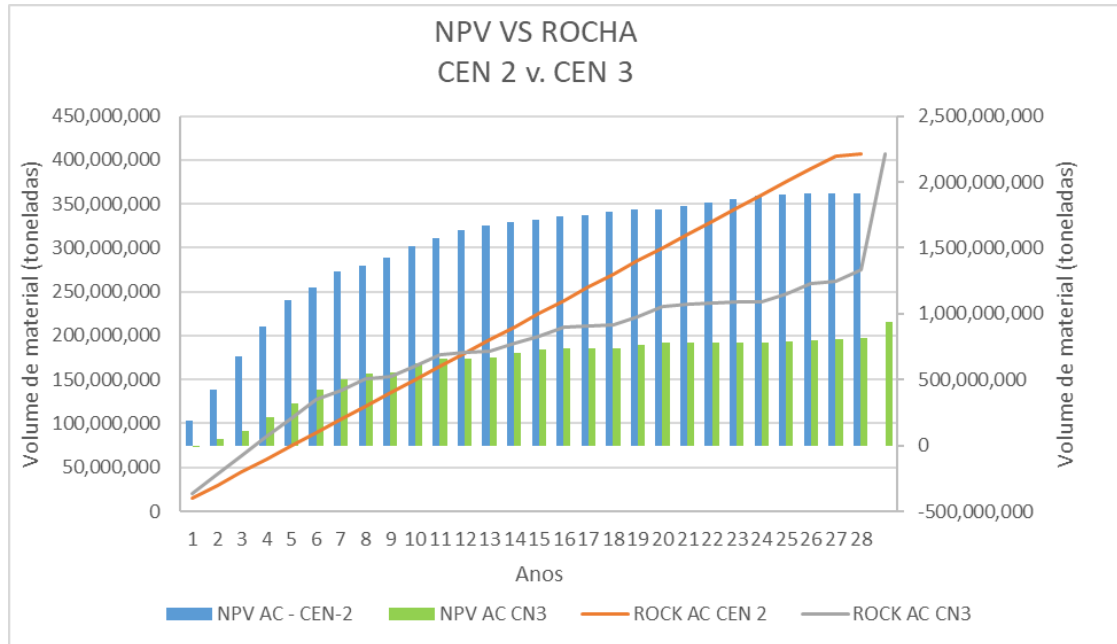
<i>SINGLE MINE</i>	Ano	Rocha [ton]	Receita	Custo de processamento	Custo de lavra	Custos de capital	VPL
CENÁRIO 3	29	407,308,320.00	R\$ 6,530,852,423.00	R\$ 891,183,490.00	R\$ 1,062,286,896.00	R\$ -	R\$ 941,310,365.00

Fonte: O autor (2021)

Como pode-se observar, o VPL foi 51% menor que o do cenário 2.

A seguir serão discutidos mais alguns resultados desse cenário em comparação com o cenário 2.

Figura 15 — VPL x Mov. Rocha dos cenários 2 e 3

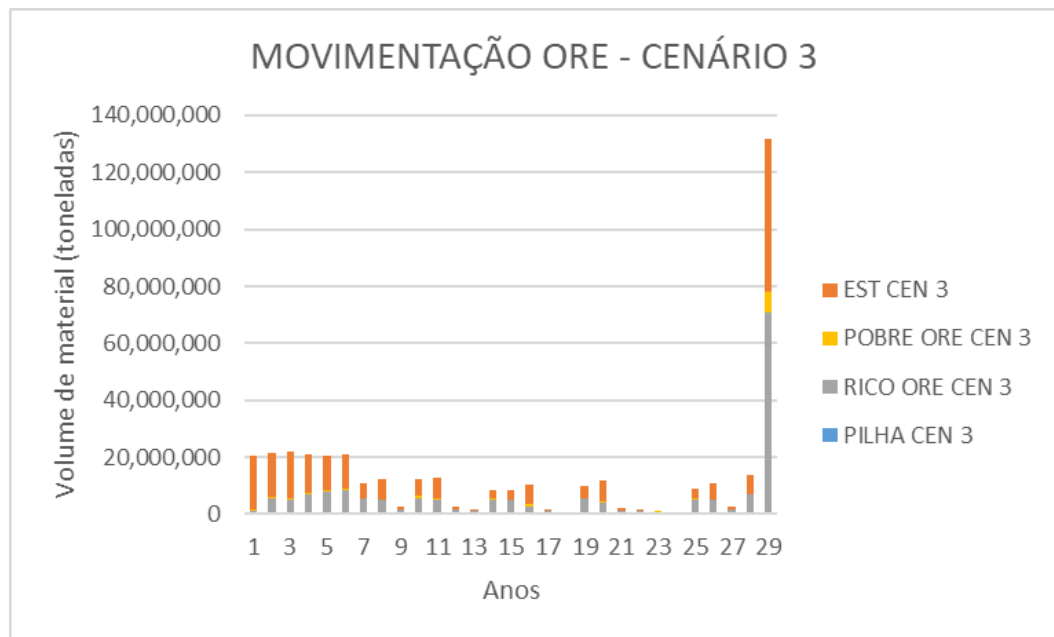


Fonte: O autor (2021)

Os valores de VPL foram discutidos previamente, mas outro dado que chama atenção é a comparação de movimentação acumulada de rocha entre os dois cenários. Enquanto o cenário 2 apresenta uma movimentação com crescimento contínuo, o cenário 3 mostra dificuldades de seguir uma produção constante devido a todos os problemas apresentados anteriormente. Nos anos finais do empreendimento é observável um enorme pico de movimentação de material, uma característica extremamente indesejável devido aos problemas que pode trazer com uso de equipamentos, capacidade da usina e operacional, dentre outros. Tal comportamento explica também o baixo valor do VPL, com o dinheiro sendo penalizado pelo longo período de tempo levado para lavrar essa grande massa de material.

No gráfico seguinte, o motivo desse pico passa a ser mais claro.

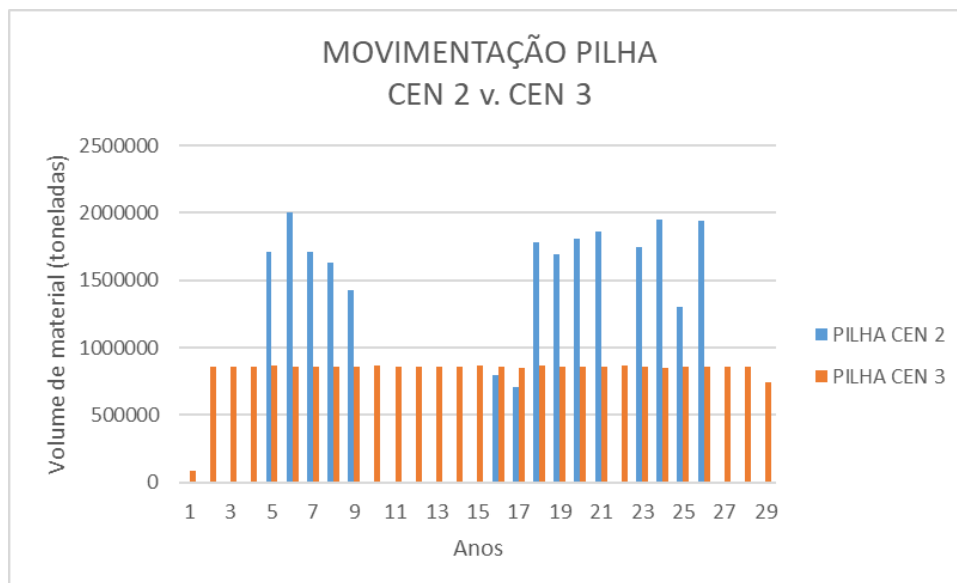
Figura 16 — Movimentação de material cenário 3



Fonte: O autor (2021)

A produção de material nesse cenário é muito inconstante, porém em seu último ano uma quantidade enorme desse material é movimentada, demonstrando um claro problema operacional deste cenário.

Figura 17 — Comparação de movimentação de pilha entre cenários 2 e 3



Fonte: O autor (2021)

O cenário 3, porém mostra-se muito eficiente em entregar uma produção constante da pilha de rejeitos, com movimentações constantes enquanto o cenário 2 oscila nesse quesito.

Este resultado, contudo, já era esperado uma vez que a movimentação da pilha é uma *hard constraint* nesse cenário, característica que pode ter contribuído para os maus resultados de movimentação geral apresentados na figura 17.

Portanto, apesar de entregar ótimos resultados no que tange a pilha de rejeitos, o terceiro cenário peca na entrega dos demais aspectos com produções muito irregulares e picos de produção, além de um VPL muito baixo.

#### 5.4 MOVIMENTAÇÕES E VPL DO CENÁRIO 4

Esse cenário foi construído usando a base com os dois modelos de blocos, da mina e da pilha, separados e foi executado no módulo *multi mine* do programa NPV *Scheduler*.

O desenvolvimento deu-se de forma bastante similar ao cenário 3, com algumas diferenças. Os princípios são os mesmos, com o grande problema a ter sido corrigido sendo a quantidade de minério que alimentava a usina, a qual passava por grandes variações, sendo um aspecto impraticável devido aos desafios operacionais impostos por oscilações como esta.

Para corrigir o problema, uma série de alternativas foram testadas usando as *constraints soft e hard*, variando parâmetros entre elas até que um resultado desejável fosse encontrado. Como resultado, chegou-se à *hard constraint* de 0,86 milhão de tonelada de minério de pilha, como mostrado no cenário 3, alterando o projeto inicial de 13,8 milhões de rocha e 1,2 milhão de minério de pilha, uma vez que estes valores não trouxeram resultados satisfatórios, impossibilitando até mesmo a comparação com o cenário 2.

Com essa situação passando a ser adequada, o que notou-se a seguir foi um desempenho insatisfatório de alimentação da usina, pois o volume que entrava era muito inconstante. Com isso, a *soft constraint* movimentação de minério foi adicionada e seus valores selecionados de acordo com a movimentação média observada na execução de testes anteriores desse cenário 4. Dessa forma, esses valores foram controlados e alimentação tornou-se muito mais uniforme, como se espera que seja.

Em sequência, visando otimizar esses valores de movimentação, foi adotada uma maior flexibilidade em relação aos *pushbacks*, alterando os chamados *bench lags*, os quais permitem que o programa tenha maior liberdade em buscar em *pushbacks* fora da sequência ordinária, materiais para continuar o planejamento, eliminando a necessidade, por exemplo, de lavar todo o estéril de um *pushback* para somente após ir lavar minério do *pushback* subsequente, permitindo maior uniformidade na retirada de materiais.

Os resultados financeiros do cenário 4 encontram-se abaixo.

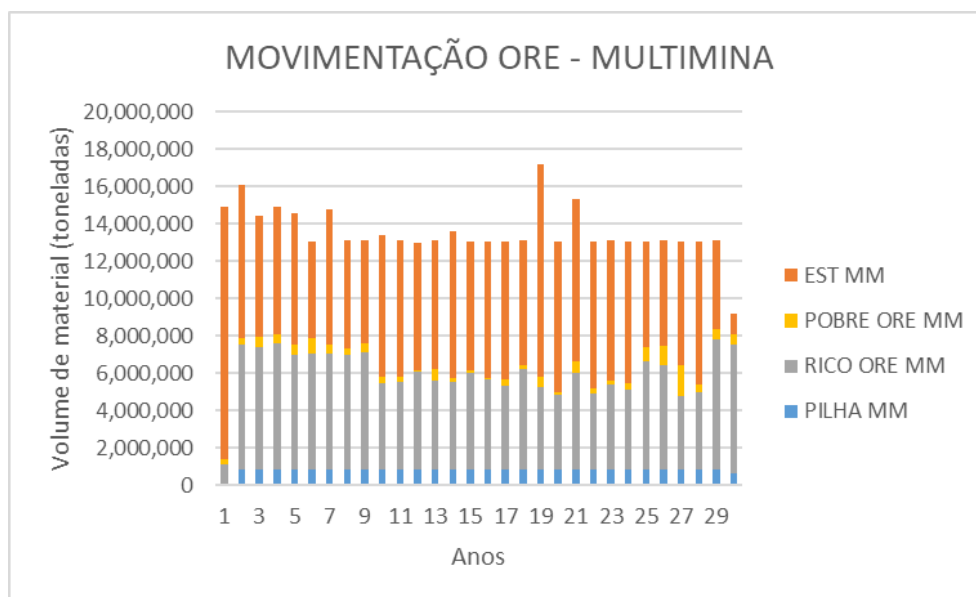
Figura 18 — Resultados financeiro do cenário 4

MULTIMINA	Year	Rock	Revenue	Processing Cost	Mining Cost	Capital Costs	NPV
MM	30	406,972,920	R\$ 6,523,915,290.00	R\$ 888,009,490.00	R\$ 1,059,335,376.00	R\$ -	R\$ 1,384,645,620.00

Fonte: O autor (2021)

O VPL do cenário ficou 28% abaixo do cenário 2, o ideal, por considerar os dois sequenciamentos de forma independente enxergando realmente a pilha como uma segunda fonte de lavra, refletindo em resultados mais reais. Porém, é expressivamente maior do que o entregue pelo cenário 3, montado em condições parecidas e diferenciados pelo modo de execução. Este cenário entrega ainda excelente movimentação de material com valores constantes, conforme figura 19.

Figura 19 — Movimentação de material do cenário 4



Fonte: O autor (2021)

Como se pode observar, no primeiro ano do projeto temos quase exclusivamente antecipação de estéril para abrir espaço para produções de materiais mais uniformes, conforme estratégia já discutida.

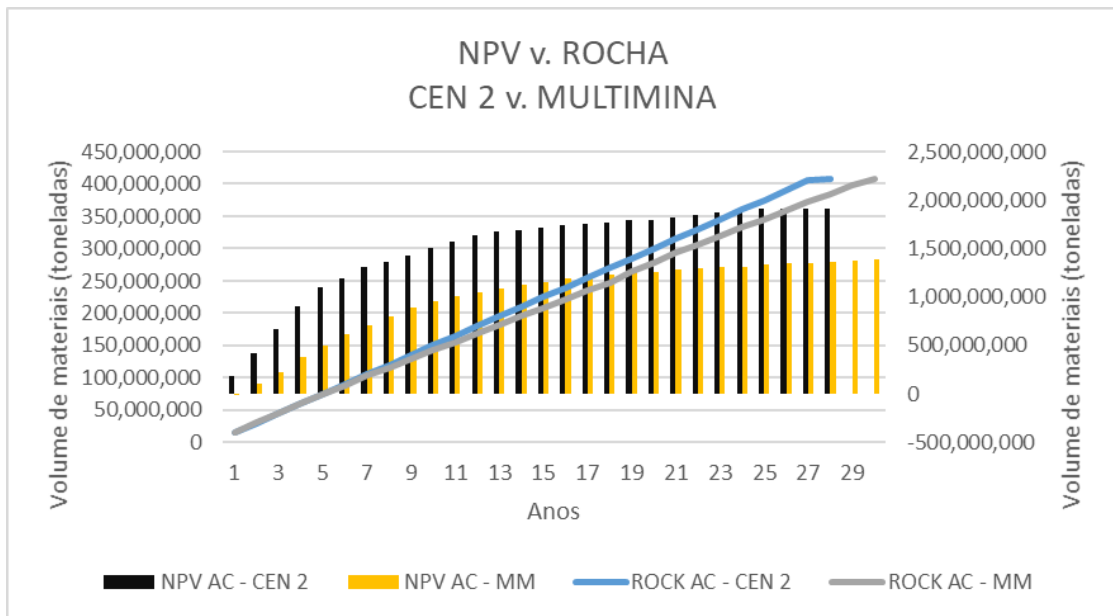
Na sequência a produção da pilha já é iniciado e mantêm-se constante durante toda a lavra, como desejado. Estéril e minério também não apresentam grandes variações mantendo-se dentro dos limites estabelecidos de acordo com as capacidades dos equipamentos e máquinas

utilizados na mina. Além disso, a vida útil da mina também esteve próxima à do cenário 2, com apenas dois anos a mais.

### 5.5 CENÁRIO 2 X CENÁRIO 4

Entrando mais a fundo nos resultados do cenário 4 e comparando-os com o cenário “ideal”, vale destacar o crescimento contínuo da movimentação total de rocha desse cenário, com comportamento muito similar ao cenário “ideal”. O VPL também cresce constantemente, apesar de se manter abaixo do cenário 2 por motivos já explicados.

Figura 20 — Comparação VPL x Mov. de Rocha dos cenários 2 e 4

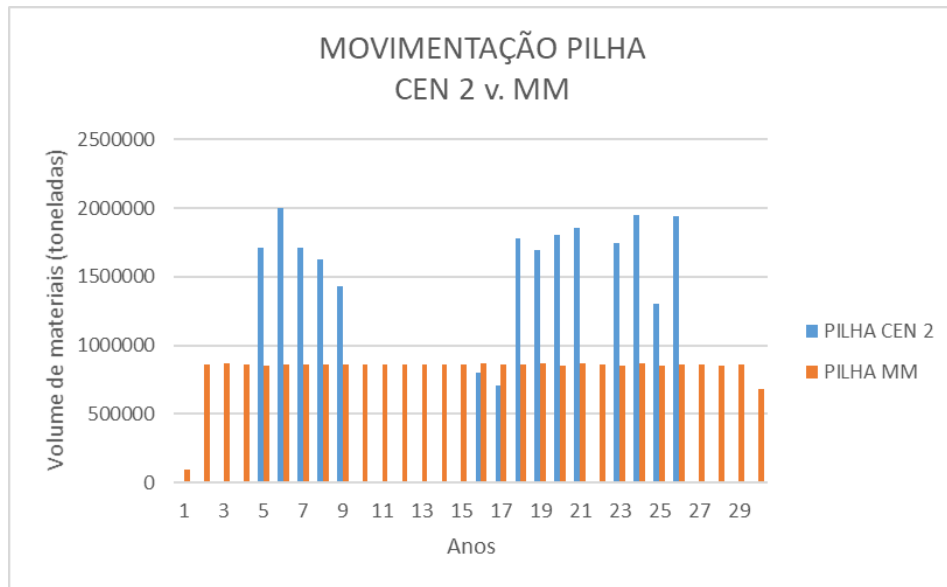


Fonte: O autor (2021)

A seguir os resultados da movimentação das pilhas são comparados.



Figura 21 — Comparação da movimentação das pilhas entre cenários 2 e 4



Fonte: O autor (2021)

Enquanto o cenário 4 manteve-se constante aos valores impostos, o cenário 2 apresentou enormes variações, inclusive com anos nos quais a produção esteve zerada. Isto se deve às restrições impostas ao cenário 2 fazendo com que ele acesse esses materiais apenas quando julgar necessário para obedecer a restrições de blendagem, por exemplo.

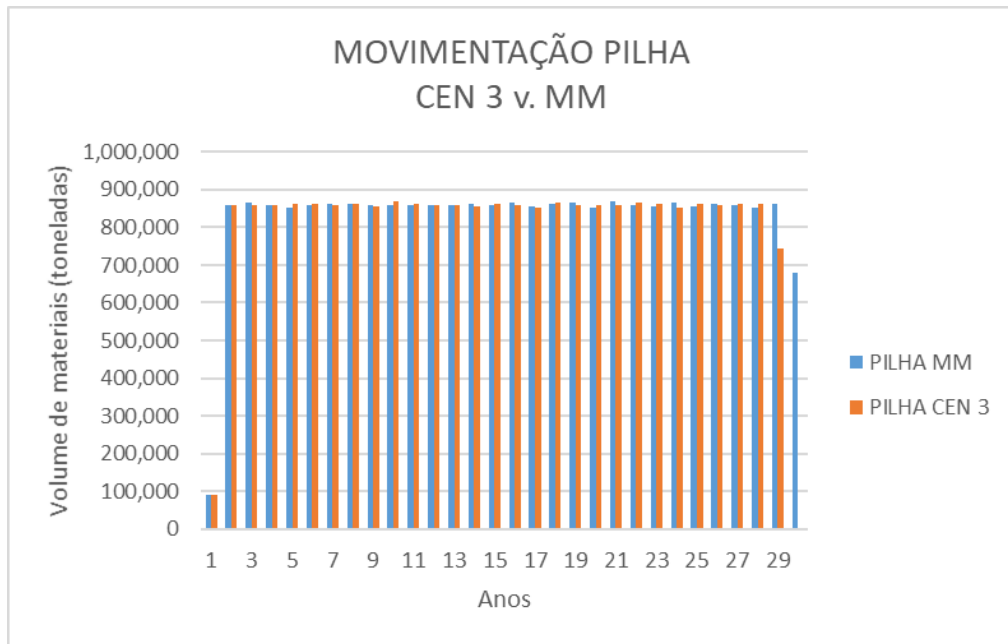
Porém são resultados impraticáveis pois aqui considera-se que esse pilha de rejeitos é uma “mina” a qual deve ser lavrada para ter seu material aproveitado e é impensável que em uma mina, tenha-se anos parados. Essa situação ilustra a limitação do uso do modo single mine em casos como este e reforça os bons resultados do cenário 4.

## 5.6 CENÁRIO 4 X CENÁRIO 3

Neste tópico são comparados e discutidos através de uma série de gráficos, os resultados dos cenários 3 e 4, os quais têm como hard constraints a movimentação da pilha de rejeitos, se diferenciando no modo de execução utilizado dentro do NPVS, conforme já explicado.

Tratando primeiro da movimentação de pilha, observa-se na figura 22 que ambos apresentam resultados similares com volumes constantes, sendo excelentes em termos operacionais.

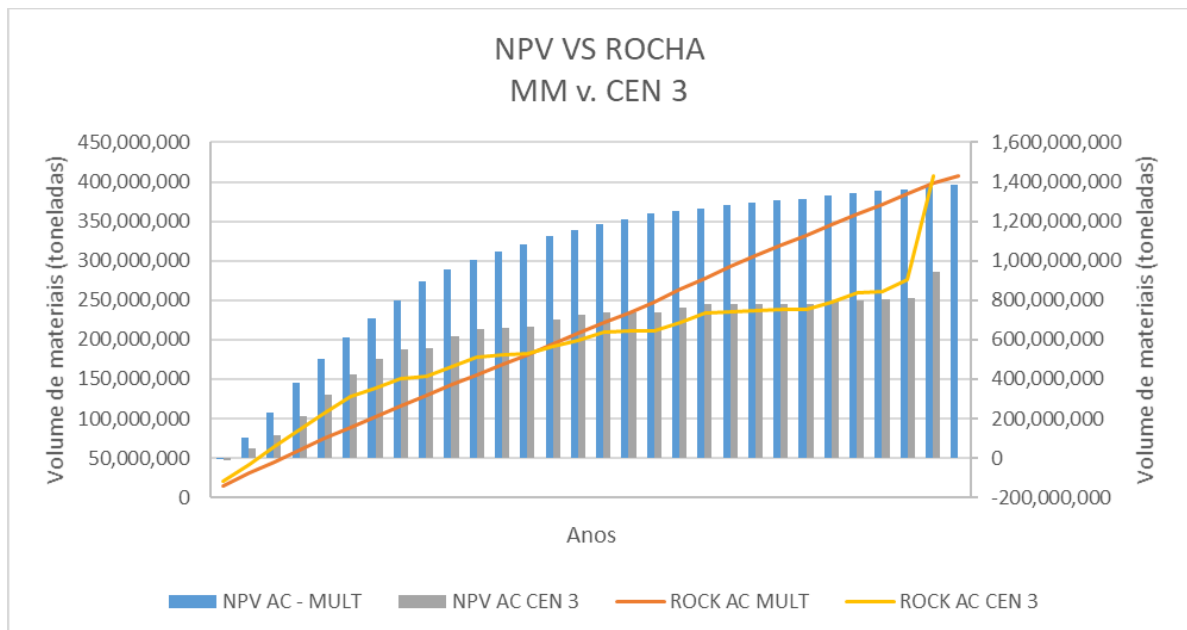
Figura 22 — Movimentação de pilha cenários 3 e 4



Fonte: O autor (2021)

Ao tratar dos resultados dos valores de VPL e movimentação de rocha entre esses cenários, a figura 23 evidencia a superioridade do cenário 4.

Figura 23 — Comparação VPL vs. Rocha entre cenários 3 e 4 (Multi mine)



Fonte: O autor (2021)

O cenário 4 entrega uma movimentação de rocha extremamente contínua enquanto o 3 peca em entregar essa constância, indicando picos de movimentação, fato discutido nos resultados desse cenário.

O terceiro cenário apresenta ainda VPL bem abaixo do cenário 4, sendo o menor resultado de todos os testes e isso pode ser explicado gráfico de movimentação desse cenário apresentado anteriormente. Neste caso, uma grande quantidade de material, inclusive minério, é movimentada no ano final do empreendimento, sendo mais penalizada pela taxa de desconto, contribuindo pra esse valor baixo.

Portanto, ao focar na movimentação da pilha e trata-la como uma mina, a qual deve ter uma produção constante para fins operacionais e financeiros, percebe-se que o cenário 4 traz os melhores resultados, com o uso do *multi mine*. Assim, foi possível obter ótimos resultados para ambas regiões lavráveis, com produções constantes, sem picos de movimentações de materiais e com um VPL muito bom, conforme ilustra a Figura 24, tornando viável o empreendimento financeira e operacionalmente.

Figura 24 — Comparação financeira entre os quatro cenários

<i>SINGLE MINE</i>	Ano	Rocha [ton]	Receita	Custo de processamento	Custo de lavra	Custos de capital	VPL
CENÁRIO 1	28	407,308,320.00	R\$ 6,530,852,423.00	R\$ 891,183,490.00	R\$ 1,062,286,896.00	R\$ -	R\$ 1,916,492,488.00
CENÁRIO 2	28	407,308,320.00	R\$ 6,530,852,423.00	R\$ 891,183,490.00	R\$ 1,062,286,896.00	R\$ -	R\$ 1,916,492,488.00
CENÁRIO 3	29	407,308,320.00	R\$ 6,530,852,423.00	R\$ 891,183,490.00	R\$ 1,062,286,896.00	R\$ -	R\$ 941,310,365.00
<i>MULTIMINA</i>	Ano	Rocha [ton]	Receita	Custo de processamento	Custo de lavra	Custos de capital	VPL
CENÁRIO 4	30	406,972,920	R\$ 6,523,915,290.00	R\$ 888,009,490.00	R\$ 1,059,335,376.00	R\$ -	R\$ 1,384,645,620.00

Fonte: O autor (2021)

## 6 CONCLUSÃO

O trabalho foi capaz de avaliar cenários de retomada de empilhamentos de minério descartados no passado devido a incapacidade de beneficiamento na época foi alcançado.

A primeira análise, obtida através do cenário 2, ao utilizar parâmetros imprecisos superestima as reservas e os resultados operacionais obtidos. Considerar o cenário ideal ou super otimista, pode impossibilitar atingir essa meta. Podem até afetar desde o planejamento de lavra ao dimensionamento de frota e usina, gerando desperdício de recursos e retrabalho. Portanto, é preciso entender que este cenário trata-se de um limite, um Best Case, e precisa ser analisado com este de olhar. Como um guia para cenários mais realistas e operacionais.

O terceiro cenário evidencia a dificuldade de conciliar a estacionalização do empilhamento drenado com a produção da mina. Ao realizar essa simulação no single mine, com a obrigação de entregar uma produção constante de material vindo do empilhamento, o programa optou por adiar a lavra de minério até os períodos finais. Com isto, estes materiais sofreram maior desconto do tempo no VPL e por consequência, este cenário entregou o menor valor de VPL entre todos estudados. Seguindo a linha de raciocínio do resultado anterior, este cenário pode ser considerado o *Worst Case*, no qual estacionalizar o empilhamento tem um elevado impacto no fluxo de caixa e pode inviabilizar o projeto.

Com o uso do modo *multi mine*, os corpos de minério podem ser encarados individualmente. Dessa forma o projeto ganha mais flexibilidade e liberdade, podendo ponderar as particularidades de cada frente de lavra e assim entregar produções mais constantes enquanto respeita as diferentes geometrias, além de entregar um alto VPL. Além de afetar positivamente o planejamento do projeto ao possibilitar uma análise mais completa das frente e, assim contribuindo para melhores escolhas durante o dimensionamento e compra de equipamentos e montagem da planta de beneficiamento, evidenciando a superioridade desse modo em relação do single mine.

A metodologia largamente empregada baseada em *pushback* mostrou-se ineficiente para analisar a lavra de duas fontes simultaneamente. Pois o avanço do *pushback* limitou a liberdade do algoritmo em retomar a pilha a valores constantes apesar de estar disponível a superfície. Como os *pushbacks* são lavrados sequencialmente por vezes foi necessário aumentar a quantidade de material movimentado para cumprir a meta de retomada da pilha. Gerando aumento de custo operacional e diminuição do valor presente líquido. Qualquer operador

responsável não iria executar o plano proposto que indicaria o aumento da movimentação de massa injustificada. Conduzindo a uma subestimativa da reserva lavrável.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Henrique Oliveira. **ESTUDO COMPARATIVO DE DUAS TÉCNICAS DE LAVRA EM BARRAGEM DE REJEITO SOB O PONTO DE VISTA GEOTÉCNICO**. 2015 Dissertação (CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ALVES, Pedro Ivo Amaro. **EMPILHAMENTO DE REJEITO FILTRADO: A EXPANSÃO DE UMA ALTERNATIVA PARA SUBSTITUIÇÃO DE BARRAGENS**. 2020 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. Rio de Janeiro, RJ, 2006 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

CAMPOS JUNIOR, Fernando Luiz Câmara. **Caracterização tecnológica de misturas de “sinter-feed” e “pellet-feed” empregando diferentes rotas de sinterização em escala piloto**. 2018 Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CAMPOS, Pedro Henrique Alves. **Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra: sequenciamento direto de blocos vs. planejamento tradicional.**, f. 80. 2017 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CARVALHO, Bruno César Lage de. **Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra**. 2012 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de *et al.* **Minério de ferro**. BDES. 2014. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4802>. Acesso em: 21 set. 2021.

CURI, Adilson. **Apostila de Planejamento de Lavra**. 2006. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/44270084/apostila-de-planejamento-de-lavra>. Acesso em: 27 set. 2021.

CURI, Adilson. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. Oficina de Textos, f. 116, 2014. 232 p.

ESPÓSITO, Terezinha de Jesus. **METODOLOGIA PROBABILÍSTICA E OBSERVACIONAL APLICADA A BARRAGENS DE REJEITO CONSTRUÍDAS POR ATERRO HIDRÁULICO**. 2000 Tese (DOUTORADO EM GEOTECNIA) - Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

GODFREY, Linda K *et al.* **Mineral waste: the required governance environment to enable re-use**. Natural Resource and Environment, CSIR. 2007. Disponível em: <https://researchspace.csiir.co.za/dspace/handle/10204/3541>. Acesso em: 19 ago. 2021.

GOMES, Márcio Fernando Mansur. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro**. 2009 Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GOVERNO DO BRASIL. **Desempenho do setor mineral em 2020 supera expectativas**. Governo do Brasil. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/financas-impostos-e-gestao-publica/2021/02/desempenho-do-setor-mineral-em-2020-supera-expectativas>. Acesso em: 21 set. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. IBRAM. 2016. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: 21 set. 2021.

MILONAS, Joice Gonçalves. **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeitos de minério de ferro em aterro hidráulico**. 2006 Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

MININGMATH. **Theory behind**. MiningMath. Disponível em: <https://knowledge.miningmath.com/start-here/theory-behind>. Acesso em: 27 set. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **RESOLUÇÃO Nº 13, DE 8 DE AGOSTO DE 2019**. Diário Oficial da União. 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>. Acesso em: 27 set. 2021.

OMACHI, Geraldo Yasujiro. **Estudos para o aumento da vida útil das minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2015 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

PAREJO, Luiz Carlos. **Minério de Ferro - Brasil é um dos principais produtores mundiais**. Uol Educação. Disponível em: <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/minerio-de-ferro-brasil-e-um-dos-principais-produtores-mundiais.htm>. Acesso em: 21 set. 2021.

PINTO, Cláudio Lúcio Lopes; DUTRA, José Ildefonso Gusmão. **CURSO: INTRODUÇÃO AO PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE LAVRA**. 2008. Disponível em: <https://docplayer.com.br/30863690-Curso-introducao-ao-planejamento-e-operacao-de-lavra.html>. Acesso em: 23 ago. 2021.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Exportação no Brasil: presença no mercado global**. Portal da Indústria. 2021. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/exportacao-e-comercio-exterior/>. Acesso em: 21 set. 2021.

PRESOTTI, Ednelson da Silva. **Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro**. Ouro Preto, 2002 Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.

ROSIÈRE, Carlos Alberto. A recristalização do minério de ferro da jazida do Pico do Itabirito no Quadrilátero Ferrífero e suas implicações genética. *In: II SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS*. 1983. 1983.

SOUSA, Gustavo Marçal de; GOMES, Romero César. Lavra de Barragens de Rejeito: Uma alternativa para manejo e desativação de estruturas. **XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Salvador, 2018.

VALE. **Terceira Onda**. Vale. 2013. Disponível em: <http://www.vale.com/PT/initiatives/innovation/itabiritos/Documents/ProjetoItabiritos/slide3.html>. Acesso em: 21 set. 2021.

WOLFF, Ana Paula. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. 2009 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.