



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

ARTHUR DE SOUZA VILELA SILVA

**AVALIAÇÃO DA CAVA FINAL COM BASE NA OSCILAÇÃO DAS
VARIÁVEIS ECONÔMICAS DO OURO E COBRE NOS PERÍODOS PRÉ E
PÓS-PANDEMIA DO COVID-19**

**ARAXÁ
2025**

ARTHUR DE SOUZA VILELA SILVA

**AVALIAÇÃO DA CAVA FINAL COM BASE NA OSCILAÇÃO DAS
VARIÁVEIS ECONÔMICAS DO OURO E COBRE NOS
PERÍODOS PRÉ E PÓS-PANDEMIA DO COVID-19**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Dr. Marcélio Prado Fontes,

ARAXÁ

2025

RESUMO

O planejamento de lavra é uma das atividades mais estratégicas da mineração, pois é nele que é garantido a quantidade e a qualidade da alimentação da usina ao longo do tempo de produção. O planejamento de mina é feito após um estudo prévio do mineral minério de interesse nas fases de exploração e avaliação. O sucesso do empreendimento está relacionado à uma boa pesquisa mineral que busca entender como deve ser o melhor aproveitamento da jazida, visando o maior lucro possível e o maior aproveitamento do recurso mineral. Para isso são considerados fatores econômicos, ambientais, políticos, de produção e de segurança que servem de entrada para a fase de delimitação dos limites de cava, sendo esta uma etapa crucial na avaliação. Nesse contexto, o estudo tem como objetivo avaliar os impactos das oscilações das variáveis econômicas na cava final através do volume de minério e estéril, REM (relação estéril/minério) e VPL (valor presente líquido) nos períodos pré-pandemia (2015 a 2019) e pós pandemia (2020 a 2024). O estudo será realizado com dados de uma mina fictícia que tem como produto principal o ouro e subproduto o cobre. Para o tratamento dos dados é utilizado o *software Studio NPVS* da empresa *Datamine*. Os resultados demonstraram que o cenário pós-pandemia levou a uma cava final mais seletiva, evidenciado pela geometria mais compacta, redução significativa a REM e priorização de blocos com maior teor de minério.

PALAVRAS-CHAVE: Planejamento de lavra, *commodities*, variáveis econômicas.

ABSTRACT

Mine planning is one of the most strategic activities in mining, as it ensures both the quantity and quality of ore feed to the plant throughout the production period. Mine planning is carried out after a preliminary study of the target ore mineral during the exploration and evaluation phases. The success of the project is directly linked to thorough mineral research, aimed at optimizing the exploitation of the deposit to maximize profit and resource utilization. To achieve this, economic, environmental, political, production, and safety factors are considered as input for the pit limit design phase, which is a crucial step in the evaluation process. In this context, the objective of this study is to assess the impacts of economic variable fluctuations on the final pit by analyzing ore and waste volumes, the stripping ratio (SR), and the net present value (NPV) during the pre-pandemic period (2015 to 2019) and post-pandemic period (2020 to 2024). The study is based on data from a fictitious mine, whose main product is gold and by-product is copper. Data processing was performed using the Studio NPVS software developed by Datamine. The results showed that the post-pandemic scenario led to a more selective final pit, as evidenced by a more compact geometry, a significant reduction in the stripping ratio, and prioritization of higher-grade ore blocks.

KEYWORDS: Mine planning, commodities, economic variables.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um modelo de blocos.....	16
Figura 2 - Modelo de Blocos com Dados	17
Figura 3 - Cava Final.....	22
Figura 4 - Representação das diferenças entre <i>pushbacks</i> convencionais e sequenciais.	24
Figura 5 - Planejamento estratégico e tático no ciclo de vida da mina.....	27
Figura 6 - Planejamento estratégico e tático.	28
Figura 7 - Representação dos principais elementos de um talude.....	29
Figura 8 - Redistribuição das tensões horizontais devido a escavação da cava.	31
Figura 9 - Parâmetros de Inclinação	37
Figura 10 - Fluxograma das Etapas do Trabalho.	38
Figura 11 - Topografia Inicial da Área de Estudo.	39
Figura 12 - Modelo de Blocos Estudado – Vista em Corte.....	40
Figura 13 - Modelo de Blocos Estudado.	40
Figura 14 – Médias Anuais dos Preços do Ouro – Períodos Pré e Pós-pandemia.....	44
Figura 15 – Médias Anuais dos Preços do Cobre – Períodos Pré e Pós-pandemia.....	46
Figura 16 - Modelo econômico em corte. A legenda identifica o material enviado para a pilha de estéril (azul), lixiviação (verde) e moagem (vermelho).	51
Figura 17 - Modelo econômico em vista completa. A mesma legenda é utilizada para identificação dos destinos do material.	51
Figura 18 - Gráfico “Pit and Phases” – Pushbacks Pré-Pandemia.....	54
Figura 19 - Vista lateral da cava final – Pré-Pandemia.	58
Figura 20 - Vista superior da cava final – Pré-Pandemia	58
Figura 21 - Modelo Econômico Pós Pandemia.	63
Figura 22 - Modelo Econômico Pós Pandemia – Vista em Corte.....	63
Figura 23 - Gráfico “ <i>Pit and Phases</i> ” – Pós Pandemia.....	67
Figura 24 - Vista Superior da Cava Final Pós-Pandemia.	72
Figura 25 - Vista Lateral da Cava Final Pós Pandemia.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Horizontes de tempo para os diferentes tipos de planejamento de lavra.	26
Tabela 2 - Células sob a Topografia	41
Tabela 3 - Número de blocos em cada eixo.....	41
Tabela 4 - Estatísticas Globais – Modelo de Blocos – Pré-pandemia.....	41
Tabela 5 - Densidades Mínima e Máxima.....	41
Tabela 6 - Informações Gerais sobre os Minérios Oxidado e Sulfetado, e Estéril.....	42
Tabela 7 - Preços utilizados de ouro e cobre pré-pandemia.....	47
Tabela 8 - Mining Reference.....	48
Tabela 9 – Ajustes de Bancada.....	49
Tabela 10 – Custos e parâmetros de recuperação para oxidados.....	49
Tabela 11 – Custos e parâmetros de recuperação para sulfetados.....	50
Tabela 12 – Parâmetros do VPL (Valor Presente Líquido).....	52
Tabela 13 - Opções de Sequenciamento.....	52
Tabela 14 - Parâmetros de Inclinação.....	53
Tabela 15 - Estatísticas Globais.....	55
Tabela 16 - Estatísticas de Minério.....	56
Tabela 17 - Estatísticas de Estéril.....	57
Tabela 18 - Informações Gerais da Cava Final.....	57
Tabela 19 - Preços utilizados de ouro e cobre pós-pandemia.....	59
Tabela 20 - <i>Mining Reference</i> - Pós-pandemia.....	60
Tabela 21 - Ajustes de Bancada - Pós-pandemia.....	60
Tabela 22 - Custos e Parâmetros de Processamento de Oxidados - Pós-pandemia.....	61
Tabela 23 - Custos e Parâmetros de Processamento de Sulfetados - Pós-pandemia.....	61
Tabela 24 - Parâmetros de VPL - Pós-pandemia.....	64
Tabela 25 - Opções de Sequenciamento - Pós-pandemia.....	65
Tabela 26 - Informações da Cava Final.....	66
Tabela 27 - Estatísticas Globais - Pós-pandemia.....	68
Tabela 28 - Estatísticas do Minério - Pós-pandemia.....	70

Tabela 29 - Estatísticas do Estéril - Pós-pandemia.....	71
Tabela 30 - Estatísticas do minério – Pré e Pós-pandemia.....	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Apresentação	11
1.2 Justificativa	12
1.3 Objetivos	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Planejamento de Lavra	14
2.2 Furos de Sondagem.....	15
2.3 Modelo de Blocos.....	15
2.4 Planejamento de lavra de longo prazo	17
2.4.1 Função Benefício	19
2.4.2 Cava final ótima	21
2.4.3 Sequenciamento de lavra	23
2.5 Planejamento de lavra de médio prazo	25
2.6 Planejamento de lavra de curto prazo.....	25
2.7 Outra nomenclatura de divisão do planejamento de lavra	26
2.8 Geometria da Cava	29
2.9 Considerações Geotécnicas	30
2.10 Métodos de Avaliação Econômica de um Projeto	31
2.10.1 Valor Presente Líquido (VPL)	32
2.11 Incertezas e Riscos na Mineração	33
3 METODOLOGIA.....	35
3.1 Modelo de Blocos.....	35
3.2 Modelo Econômico.....	35
3.2.1 Função Benefício	35
3.2.2 Histórico de Preço.....	35

3.2.3 Custos.....	36
3.3 Modelo Geotécnico	36
3.4 Cava Final.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 Pré Pandemia	39
4.1.1 Topografia Inicial.....	39
4.1.2 Modelo de Blocos	40
4.1.3 Modelo Econômico	43
4.1.3.1 Histórico de Preço	43
4.1.3.2 Custos	46
4.1.3.3 Modelo econômico - Pré-Pandemia.....	47
4.1.4 <i>Inputs</i> da Cava Final.....	52
4.1.5 Resultados da Cava Final.....	53
4.1.6 Imagens da Cava Final.....	58
4.2 Pós-Pandemia.....	59
4.2.1. <i>Inputs</i> Modelo Econômico.....	59
4.2.2 <i>Inputs</i> Cava Final.....	64
4.2.3 Resultados da Cava Final.....	66
4.2.4. Imagens da Cava Final Pós-Pandemia.....	71
4.3 Comparação da Cava Final Pré e Pós-Pandemia	73
5. CONCLUSÃO.....	77
6. REFERÊNCIAS.....	79

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Valor Econômico do Bloco.....	20
Equação 2 - Custos Indiretos.....	20
Equação 3 - Critérios de Otimização.....	20
Equação 4 - Equação do VPL.....	32

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A mineração é uma atividade de grande importância para manutenção do padrão de vida e avanços da sociedade moderna, fornecendo recursos básicos para diversos setores da indústria e contribuindo para a geração de riquezas e desenvolvimento socioeconômico de várias cidades e regiões, no Brasil e no mundo. "O setor mineral é fundamental para a sociedade moderna, sendo a base para a produção de bens de consumo duráveis, infraestrutura e tecnologias essenciais ao bem-estar e à qualidade de vida." — (IBRAM, 2020). No entanto, os recursos minerais são finitos e não renováveis.

De acordo com Costa, R. R. (1979), a indústria de mineração, como qualquer outro empreendimento, tem por objetivo econômico básico maximizar a sua riqueza futura. Entretanto, é caracterizada por visar o aproveitamento econômico de um bem de capital exaurível e não renovável, o que a diferencia das demais indústrias. Assim, a maximização da riqueza futura deve se realizar em um período definido, ou seja, durante a existência do bem mineral que lhe deu origem. Em termos econômicos, podemos dizer, mais apropriadamente, que o objetivo da indústria de mineração é a maximização do valor atual líquido dos benefícios monetários futuros, durante toda a vida da mina.

Segundo Curi (2014) o planejamento de lavra corresponde ao projeto de sequenciamento de lavra envolvendo a previsão dos recursos e a determinação dos custos intrínsecos a esse *pushback*. No entanto, todo o trabalho de planejamento de lavra pode ser dividido em três fases, o qual pode ser dividido em planejamento de longo, médio e curto prazo.

O planejamento de lavra de longo prazo é responsável pelos estudos de cava final, sequenciamento de lavra e dimensionamento de frota. No entanto, a principal função do planejamento de longo prazo é definir as reservas lavráveis. Adicionalmente os trabalhos de geologia devem estar inseridos dentro do planejamento de longo prazo, através do modelo tridimensional de blocos tecnológicos, sendo este a principal fonte de informações para todas as fases do planejamento.

De acordo com IBRAM (1996), o planejamento de médio prazo tem a responsabilidade de garantir a continuidade do processo de lavra, através da escolha de um caminho, objetivando a estacionarização de determinados parâmetros sendo os técnicos e econômicos envolvidos no dia a dia das atividades de operação de lavra, além de promover a infraestrutura básica para o planejamento de curto prazo.

1.2 Justificativa

Os fatores econômicos têm papel crucial na rentabilidade de empreendimentos mineiros, sendo o preço da commodity um dos mais determinantes. Segundo Whittle (2011), ele influencia diretamente decisões críticas no planejamento da mina, como a taxa de produção ótima, os limites da cava final e o grau de flexibilidade operacional. Além disso, a avaliação financeira de uma cava final deve considerar variáveis como a taxa de juro vigente no mercado, que afeta o custo de capital e, conseqüentemente, o valor presente líquido (VPL) do projeto. A taxa de desconto, usada para trazer os fluxos de caixa futuros a valor presente, representa o custo de oportunidade do capital e incorpora os riscos financeiros, operacionais e mercadológicos envolvidos. Também é essencial considerar os prazos de retorno do investimento e os riscos econômicos e políticos que podem impactar a estabilidade e atratividade do projeto ao longo do tempo. Assim, a análise financeira deve ir além dos custos e receitas estimados, contemplando o ambiente macroeconômico e suas possíveis oscilações.

As variações no preço do minério representam um dos fatores de maior impacto econômico em projetos de mineração, dada sua influência direta na receita esperada do empreendimento. A redução no preço de mercado pode inviabilizar economicamente blocos de menor teor, resultando na diminuição do volume total de reservas lavráveis e na alteração dos limites econômicos da cava. Por outro lado, cenários de valorização do minério ampliam os limites econômicos da cava, viabilizando a inclusão de blocos de menor teor e aumentando o potencial de aproveitamento do depósito mineral. Assim, projeções robustas e acuradas dos preços das *commodities* são essenciais para

fundamentar decisões estratégicas no planejamento mineiro e mitigar riscos financeiros.

1.3 Objetivos

Nesse contexto, o estudo tem como objetivo avaliar os impactos das oscilações das variáveis econômicas na cava final através do volume de minério e estéril, REM (relação estéril/minério) e VPL (valor presente líquido) nos períodos pré-pandemia (2015 a 2019) e pós pandemia (2020 a 2024).

Um dos objetivos específicos do trabalho é explorar a aplicação prática dos softwares utilizados nas simulações de planejamento de mina, com ênfase na compreensão de suas funcionalidades e contribuições para a execução eficiente dessas atividades.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Planejamento de Lavra

Segundo Hustrulid e Kuchta (2006), o planejamento de lavra faz parte da fase avaliação, sendo esta a fase de um projeto responsável por avaliar a atratividade econômica de uma ocorrência mineral. O final desta fase é marcado pela elaboração de um relatório de viabilidade, que decide se o projeto é viável ou não economicamente. Se no projeto for decidido prosseguir, as fases de desenvolvimento, exploração e fechamento da mina, continuarão, caso contrário, o projeto é arquivado e a área é devolvida à União para novas pesquisas minerais.

Segundo Chimuco (2010), o planejamento da mina tem como principal objetivo garantir a eficiência e a viabilidade da operação. Para isso, busca-se maximizar a vida útil do empreendimento, reduzir os custos de produção e assegurar o cumprimento das metas de movimentação de estéril e minério. Além disso, o planejamento deve garantir que o teor do material extraído esteja em conformidade com as especificações técnicas exigidas.

A grande maioria das minas possuem múltiplas frentes de lavra de minério, cada uma com características e qualidades próprias. A mineração feita sem planejamento pode resultar na extração de um produto de má qualidade que não atende às especificações do cliente, seja interno ou externo. Ao mesmo tempo, isso pode gerar, em determinadas situações, a extração de um produto de qualidade superior à especificada, o que inevitavelmente inviabiliza o restante da mina e impossibilita a lavra de teores de minério inferiores. A falta de planejamento também pode levar a movimentação incorreta de estéril, liberação de minério com qualidade não adequada para aquele momento da exploração, aumentar a proporção de estéril/minério e, portanto, custos operacionais e, em casos graves, até mesmo levar a mina ao fim de sua vida útil mais cedo.

Segundo Curi (2014) o planejamento de mineração é um projeto de desenvolvimento de mina que envolve previsão de recursos e determinação de custos. Com o progresso das operações mineiras surgem novas informações sobre os recursos minerais, resultando em contínuas adaptações ao plano original.

2.2 Furos de Sondagem

Segundo Hartman & Mutmanský (2002) a perfuração de furos para sondagem é atualmente a alternativa mais econômica e rápida para obter amostras representativas de depósitos minerais, seja em saliência ou em profundidade. Os três métodos de perfuração mais comuns usados na exploração mineral são perfuração rotativa, perfuração rotativa diamantada e perfuração rotativa ou percussão rotativa com circulação reversa. A seleção do método de perfuração mais adequado dependerá do tipo e das características da mina em estudo.

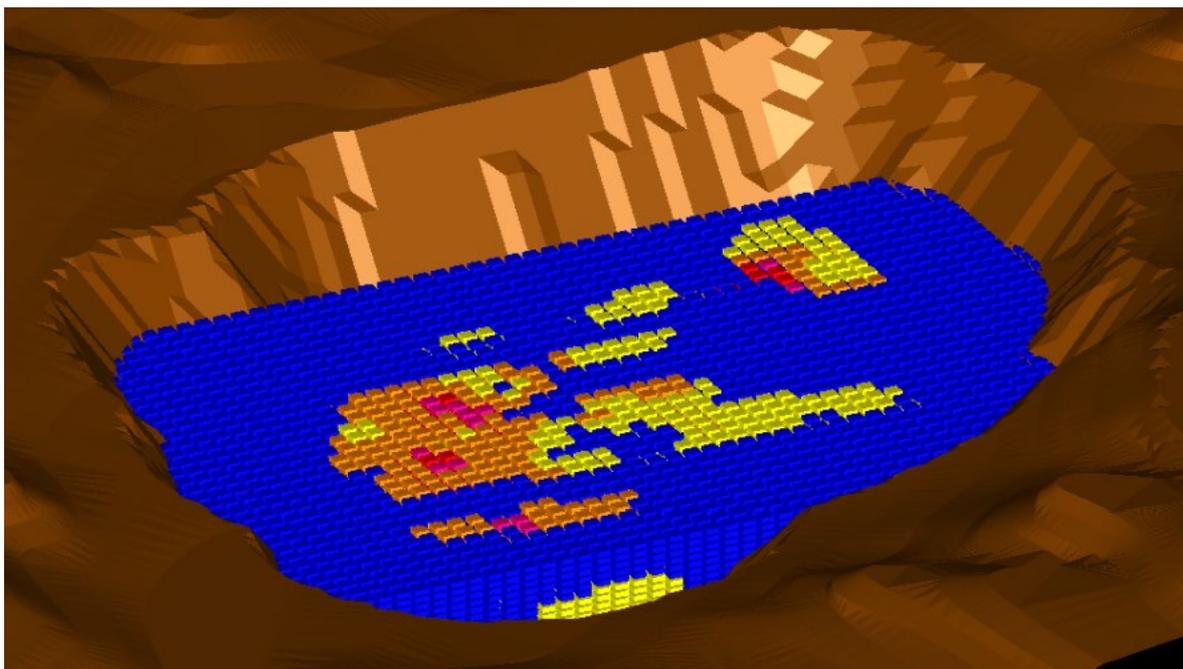
De acordo com Hustrulid, W.; Kuchta, M.; Martin, R. K. (2013), a maioria das jazidas minerais são exploradas atualmente por perfuração diamantada rotativa. Este método produz um núcleo cilíndrico, conhecido como núcleo de perfuração, a partir da rocha perfurada. A análise de núcleo fornece um perfil geológico contínuo da área, mostrando pontos de contato geológico, espessuras de camada e uma representação de recursos e estruturas existentes dentro da mina. Cada furo é pesquisado em detalhes e suas informações são registradas em um processo, chamado *logging*.

A utilização das informações obtidas dos testemunhos, bem como o conhecimento geológico e topográfico do local, permite a construção de uma representação tridimensional do corpo de minério. O objetivo é estimar melhor o tamanho, a forma e a distribuição do conteúdo do depósito. (HUSTRULID et al., 2013).

2.3 Modelo de Blocos

A divisão do volume do depósito mineral em blocos é a base para o uso de ferramentas computacionais para estimativa de recursos/reservas, planejamento e sequenciamento da mina. Segundo Amaral (2008), um modelo de blocos é uma representação tridimensional de uma mina ou jazida mineral, subdividida em vários blocos. A Figura 1 ilustra a representação de um modelo de blocos.

Figura 1 - Representação de um modelo de blocos.



Fonte: Candido (2012).

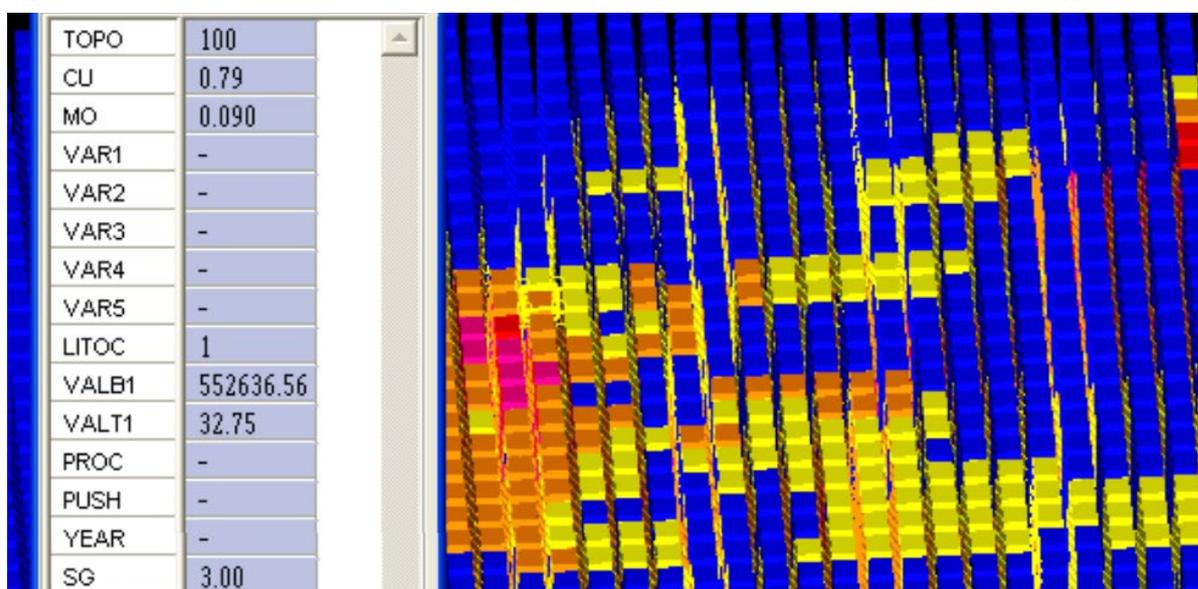
A construção do modelo de blocos parte da informação de nível obtida através da descrição e análise de furos, geo-localizados de acordo com o esquema de amostragem. Em seguida, é gerada uma representação tridimensional composta por uma série de blocos, cobrindo toda a região de interesse. Blocos definidos para perfuração são amostrados e tem o teor do mineral de interesse avaliado, enquanto para outros blocos sem informação, chamados de "vazios", será necessário utilizar determinados meios de estimativa para que recebam os valores dos atributos que interessam.

Carmo (2001) e Candido (2012) dizem que a forma e o tamanho dos blocos podem variar dependendo das características do depósito. Blocos retangulares ou quadrados são comumente utilizados, com tamanho constante ou variável. Segundo Fontes (2016), a escolha do tamanho dos blocos depende principalmente da heterogeneidade do corpo de minério e da distância de amostragem. David (1977) comentou que o tamanho mínimo dos blocos não deve ultrapassar $\frac{1}{4}$ da malha amostral, e que o uso de blocos muito pequenos leva a uma suavização excessiva, pois quando o tamanho dos blocos for reduzido, o erro de estimativa para cada bloco aumenta, o que pode levar a imprecisões no modelo final. Em relação à altura dos blocos, segundo Hustrulid,

W.; Kuchta, M.; Martin, R. K. (2013), em depósitos superficiais, isso muitas vezes coincide com as alturas dos bancos.

De acordo com Candido (2012), o valor econômico atribuído a cada bloco no modelo, é calculado a partir de uma função benefício que representa o valor monetário (positivo ou negativo) dos blocos, dada a receita e o custo descontado, conforme mostra na Figura 2. A definição do projeto com melhor rentabilidade é feita por meio de algoritmos de otimização, considerando um cenário econômico definido que, a cada mudança, como novas campanhas de amostragem ou variação muito grande da *commodity* e/ou custos, se tornará obsoleto e deverá ser reavaliado.

Figura 2 - Modelo de Blocos com Dados



Fonte: Candido (2012)

2.4 Planejamento de lavra de longo prazo

As mineradoras que extraem e processam diferentes tipos de minérios têm que lidar com flutuações de preços de mercado, que ocorrem frequentemente (NEWMAN et al., 2010). Portanto, é necessário adotar uma das formas de maximizar os lucros e controlar a produção para que ela se torne eficiente e capaz de gerenciar essas flutuações.

Uma das formas mais eficientes de aumentar a competitividade das empresas está na implementação de um sistema eficaz de planejamento e

controle da produção. Esse sistema permite alinhar as operações aos objetivos estratégicos da organização, assegurando que todas as atividades sejam realizadas no momento adequado, na quantidade planejada e dentro do prazo estipulado. Além disso, garante que os produtos ou serviços sejam entregues com a qualidade exigida, utilizando os recursos de forma otimizada. De acordo com Cacceta e Hill (2003), essa integração entre planejamento e execução é fundamental para que as empresas se mantenham competitivas em mercados cada vez mais exigentes, onde eficiência e precisão são diferenciais determinantes para o sucesso.

Segundo Periotto (1992), a definição da cava ótima está diretamente relacionada à seleção criteriosa dos blocos que devem ser extraídos, com o objetivo de maximizar o lucro total do empreendimento. Essa seleção não se baseia apenas em aspectos econômicos, mas também leva em consideração configurações que garantem a segurança e a viabilidade operacional do processo de lavra. Dessa forma, a cava ótima resulta do equilíbrio entre a maximização do retorno financeiro e o atendimento às exigências técnicas, como a estabilidade dos taludes, acessibilidade, e eficiência das operações de extração. Este conceito é fundamental para assegurar que o projeto seja sustentável e seguro ao longo de sua vida útil, respeitando tanto os limites econômicos quanto os operacionais.

Mandarino (2018) afirma que o planejamento de longo prazo de uma mina inclui estudos de viabilidade, investimentos, expansão e cortes de produção, onde especialistas são responsáveis por determinar a taxa ideal de produção anual e a cava final ótima para a mina. Segundo Campos (2017), a cava ideal é a quantidade de material que pode ser extraída economicamente e obtém o maior benefício possível do empreendimento de mineração.

De acordo com Curi (2014), o planejamento de longo prazo em operações de mineração vai muito além do simples cálculo das reservas disponíveis. É necessário incorporar uma série de etapas e definições estratégicas que garantam a viabilidade e a eficiência do projeto ao longo de toda a sua vida útil. Entre esses elementos, destacam-se a elaboração do projeto da cava final e da pilha de estéril, que devem ser dimensionados de forma a otimizar tanto a extração quanto o armazenamento seguro dos estéreis. Além disso, o

planejamento deve contemplar o sequenciamento adequado da lavra, estabelecendo a ordem e o ritmo de extração dos blocos, bem como a seleção dos métodos de extração mais apropriados para as características geológicas e econômicas do depósito. Outro aspecto fundamental é a determinação do tamanho e da composição da frota de equipamentos, assegurando que os recursos físicos sejam suficientes e adequados para atender às demandas operacionais até o encerramento das atividades de lavra. Assim, um planejamento de longo prazo bem estruturado é essencial para garantir a sustentabilidade, a eficiência e a rentabilidade da operação mineradora.

2.4.1 Função Benefício

Uma vez definidos os valores médios de teor (e outros atributos de interesse) para todos os blocos presentes no modelo geológico, eles devem ser avaliados em relação a critérios econômicos, atribuindo a cada bloco um determinado valor monetário, seja positivo ou negativo. Para tanto, uma equação chamada função benefício é criada e adotada como critério de avaliação econômica do bloco (NETO, 2017). Segundo Cândido (2012), em linhas gerais, o lucro pode ser entendido como a diferença entre receita e custo.

Segundo Flores (2008), a otimização da cava visa maximizar o valor total. Portanto, neste caso, a maior dificuldade para um projeto de mina é encontrar o conjunto de blocos que proporcione o maior valor respeitando as restrições de lavra e a estabilidade da mina (CARMO, 2001). Portanto, a determinação do valor econômico de cada bloco torna-se a base para o planejamento da lavra obter o melhor aproveitamento do depósito. Portanto, segundo Carmo (2001), cada bloco dentro do domínio do modelo pode ser caracterizado como:

- ✓ Renda (R): valor da parte recuperável e vendável do bloco.
- ✓ Custos Diretos (CD): custos que podem ser atribuídos diretamente ao bloco, como custos de perfuração, detonação, carregamento, transporte, etc.
- ✓ Custos Indiretos (CI): custos gerais que não podem ser atribuídos individualmente a cada bloco. Tais custos dependem do tempo, sendo que, entre

estes incluem-se, por exemplo, os custos relativos a salários, custos de pesquisa, manutenção, depreciação de equipamentos, etc.

Com esses parâmetros, o valor econômico do bloco (VEB) pode ser determinado através da equação 1 (CARMO, 2001):

Equação 1 - Valor Econômico do Bloco.

$$VEB = R - CD$$

Observe que a Equação 1 não inclui lucro ou prejuízo. Nesse caso, os custos indiretos (CI) devem ser levados em consideração, conforme mostrado na equação 2 (CARMO, 2001):

Equação 2 - Custos Indiretos.

$$\text{Lucro (ou prejuízo)} = \sum_{j=1}^n (VEB)_j - CI$$

Onde: $j = 1, 2, 3, \dots n$.

n = número de blocos

Blocos de estéril normalmente têm um VEB negativo porque a receita de estéril é zero na maioria dos casos e os custos de mineração continuam existindo. Blocos de minério ou blocos contendo minério e estéril podem ter VEB menor que zero, igual a zero ou maior que zero, dependendo da quantidade e qualidade do minério neles contido (teor médio de bloco) (NETO, 2017).

Os critérios de otimização para o problema de dimensionamento do limite da cava podem então ser determinados pela equação 3 (CARMO, 2001):

Equação 3 - Critérios de Otimização.

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{j=1}^n (VEB)_j$$

2.4.2 Cava final ótima

Segundo Neto (2017), o projeto da cava final é o primeiro passo no planejamento da lavra. De acordo com Hustrulid et al. (2013) a forma e o tamanho da área a ser lavrada dependem de parâmetros econômicos e restrições de projeto e produtividade.

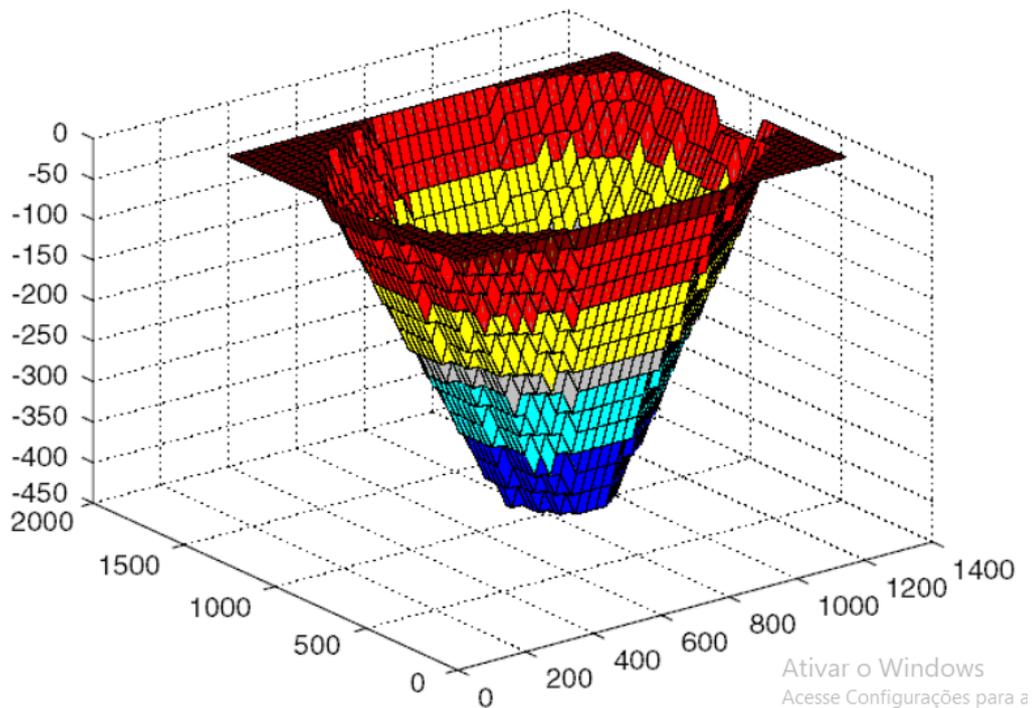
Segundo Silva (2008), a definição dos contornos da cava final está diretamente condicionada às variáveis econômicas e técnicas do projeto de mineração, como preços de commodities, custos operacionais, parâmetros geotécnicos e teor de corte. Portanto, muitos fatores, como preços do minério, custos de produção, tecnologias de tratamento, mudanças nos padrões geológicos, entre outros, têm o potencial de alterar o limite da cava final.

A cava final ótima define as reservas exploráveis e os limites em que a mineração deixa de ser rentável (CARMO, 2001). Esta deve ser projetada no início do trabalho de planejamento, sendo reconsiderado frequentemente, durante toda a vida útil da mina (CARMO et al., 2006). Logo, Morales (2003) comenta que isso é preciso devido as incertezas ao longo do tempo.

A importância de determinar a cava final tem relação à maximização da riqueza futura (CARMO et al., 2006) e ao apoio à decisão em um ambiente caracterizado pela necessidade de grandes investimentos em projetos e aquisição de equipamentos (AMARAL, 2008). Além disso, sua forma deve ser conhecida antes do início da escavação (HOCHBAUM, 2004). Isso é necessário para localizar e construir estruturas de suporte, como usinas de beneficiamento de minério, estradas, barragens e sistemas de drenagem, pois muitas delas devem estar localizadas fora dos limites da mina e não se moverem ao longo do tempo. (HUSTRULID e KUCHTA, 1995; KUNRAL e DOWD, 2005).

Para projetar uma cava final, conforme ilustrado na Figura 3 é necessário um modelo tridimensional de blocos específico para a área da mina e que incorpore os respectivos pesos relacionados ao custo de lavra, informações sobre a receita calculada a partir da venda do concentrado e informações sobre o ângulo de inclinação para garantir a segurança da mina (HOCHBAUM e CHEN, 2000).

Figura 3 - Cava Final



Fonte: Amaral (2008)

A partir dessas informações, encontrar a cava final ótima, de acordo com Peroni (2002) e também Flores (2008), equivale a encontrar a configuração resultante que apresente um dos objetivos listados:

- A máxima lucratividade;
- O maior valor presente líquido (VPL);
- O maior aproveitamento dos recursos minerais.
- Maximizar o conteúdo de metal da mina;
- Minimizar os custos de produção;
- Definir escalas de produção;
- Atender políticas de risco.

Apesar da variedade de abordagens, o critério mais comum permanece a maximização da lucratividade total da mina, alcançada pelo VPL máximo. E desde a teoria dos grafos aplicada por Lerchs-Grossmann em 1965, reconhecido como a única a resolver o problema de otimização de cava final, o problema tem sido estudado extensivamente (CARMO *et al.* associados, 2006).

Atualmente, sua solução ótima pode ser encontrada com o algoritmo proposto por Lerschs-Grossmann (HUSTRULID & KUCHTA, 1995). Outra maneira é o algoritmo de fluxo máximo, denominado "*push-relabel*", proposto por Hochbaum & Chen (2000). Segundo os autores este apresenta desempenho superior ao algoritmo de Lerchs-Grossmann em todos os casos testados, especialmente em relação à economia no uso de RAM (*random access memory*).

No entanto, segundo Peroni (1995), a técnica dos cones flutuantes, baseada em programação dinâmica, embora não garanta uma solução ótima, é um dos métodos mais utilizados. Carmo (2001) atribui a lenta aceitabilidade do algoritmo de Lerchs-Grossmann às dificuldades de sua implementação, à combinação dos diferentes ângulos de inclinação e principalmente ao longo tempo computacional necessário para a implementação.

2.4.3 Sequenciamento de lavra

Com base no modelo econômico, é definido um valor de benefício para cada bloco, que pode ser positivo ou negativo. Com base neste valor e através da aplicação de algoritmos de otimização, pode ser definida uma gama de reservas recuperáveis, delimitadas pelos contornos da cava final ótima. No contexto do planejamento de mina, o próximo passo é estabelecer uma sequência lógica e adequada para minerar blocos dentro dos limites da cava final (NETO, 2017).

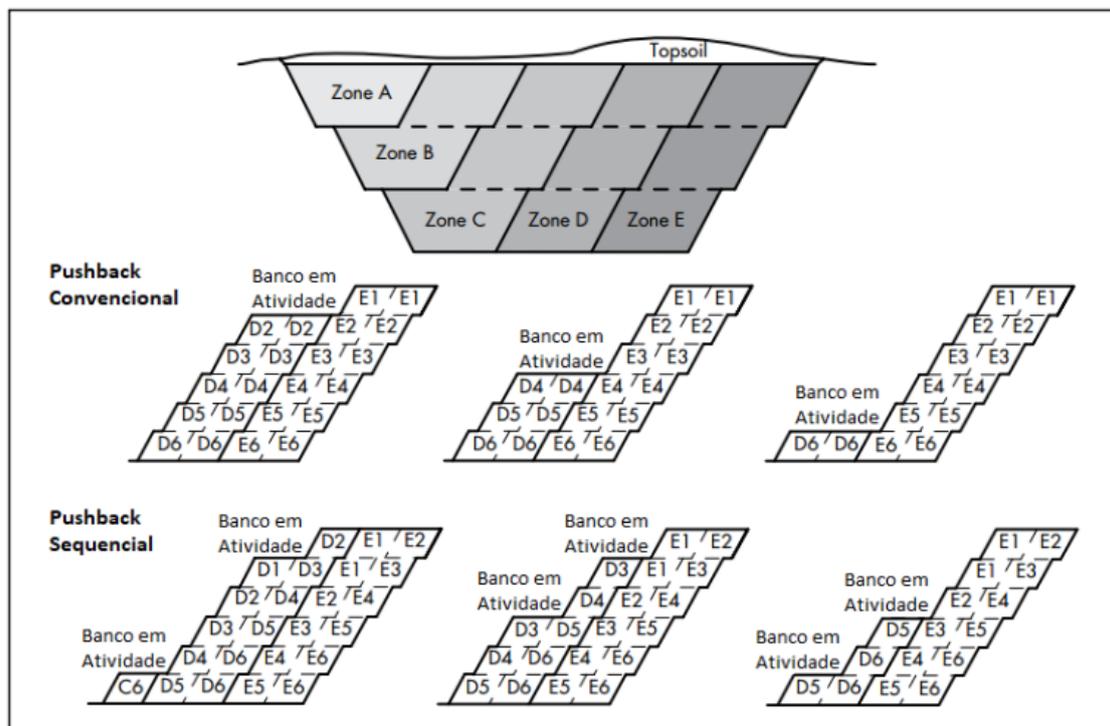
Portanto, o problema fundamental do sequenciamento é encontrar a sequência em que a extração dos blocos selecionados maximiza o lucro, geralmente expresso pelo VPL resultante da extração desses blocos (TOLWINSKI; UNDERWOOD , 1996).

Segundo Wetherelt e Wielen (2011), o andamento das operações em uma mina ocorre em etapas, conhecidas como *pushbacks* ou *cutbacks*. Esses avanços definem a ordem em que os blocos devem ser extraídos à medida que a cava se expande. Do ponto de vista do planejamento da mina, para obter o máximo retorno econômico dos blocos de mineração, é necessário a execução dos *pushbacks*. Isso significa levar em consideração não apenas o conteúdo do

bloco, mas também todos os custos de desenvolvimento, exploração, processamento e comercialização.

De acordo com Neto (2017), o *pushback* convencional é significativamente menos complexo de planejar do que o sequencial, que, além de fornecer uma área útil maior para as operações de mineração, permite uma mineração mais multifacetada no mesmo nível. Por outro lado, é menos flexível em termos de sequência de lavra e opções de blendagem de minério, o que também é mais suscetível a problemas operacionais, devido à natureza mais restrita da lavra. Fontes (2016) comentou que o *pushback* sequencial é mais comum em minas maiores, enquanto o *pushback* convencional é mais utilizado em minas de menor escala de produção ou em corpos de minério mais rasos. A Figura 4 mostra as principais diferenças entre os dois tipos de *pushbacks*.

Figura 4 - Representação das diferenças entre *pushbacks* convencionais e sequenciais.



Fonte: Neto (2017, p.36).

A principal diferença entre os dois tipos de *pushbacks* mostrados na Figura 4 é a progressão horizontal da mina. No *pushback* convencional, a mineração é concentrada em um único nível horizontal até que seja totalmente

minerada. O *pushback* sequencial, por outro lado, divide as operações em diferentes níveis horizontais, o que muitas vezes o torna mais complexo para planejar (NETO, 2017).

2.5 Planejamento de lavra de médio prazo

Segundo Campos (2017), o planejamento de médio prazo é importante para garantir que os objetivos de médio prazo sejam alcançados. Normalmente este plano cobre um período de 1 a 5 anos.

Pinto e Dutra (2008) mencionam que o planejamento de médio prazo desenvolve um plano de produção para maximizar o valor presente líquido e obter um retorno sobre o investimento inicial. Os equipamentos e sistemas de operação da mina são usados para atingir critérios de produtividade ideais, garantindo uma continuidade razoável das operações, além de providenciar a infraestrutura necessária para que o planejamento de curto prazo possa ser executado.

2.6 Planejamento de lavra de curto prazo

O planejamento de lavra de curto prazo tem como foco principal orientar as atividades operacionais da mina em períodos mais imediatos, que podem variar de alguns dias até poucos meses. Esse planejamento detalha as ações necessárias para garantir o cumprimento das metas estabelecidas pelo planejamento de médio e longo prazo. De acordo com Hustrulid e Kuchta (2013), ele é fundamental para organizar de forma eficiente as operações de escavação, perfuração, desmonte, transporte e deposição de estéril ou minério.

Além de direcionar a sequência operacional, o plano de curto prazo também visa otimizar o uso da frota e dos equipamentos disponíveis, reduzir os tempos ociosos e minimizar os custos associados. Outro aspecto importante é a necessidade de rápida adaptação a eventuais mudanças geológicas, climáticas ou de disponibilidade de recursos, o que exige um acompanhamento constante da produção em campo.

O planejamento de curto prazo permite ainda garantir o controle de qualidade do minério extraído, para que este atenda às especificações exigidas pela planta de beneficiamento. Por isso, trata-se de uma etapa essencial para manter a estabilidade e a eficiência da produção da mina no dia a dia.

2.7 Outra nomenclatura de divisão do planejamento de lavra

Em geral, o planejamento pode ser descrito como um processo de determinação de como uma empresa pode atingir suas metas e objetivos no futuro (CAMUS, 2002). Ao definir esses objetivos, são criados planos para alcançá-los gradativamente, da forma mais eficiente, eficaz e com a menor concentração de esforços e recursos por parte da empresa (OLIVEIRA, 2007).

Segundo Flores (2008), a indústria de mineração geralmente divide o planejamento de mina à céu aberto em três prazos: planejamento de longo prazo, planejamento de médio prazo e planejamento de curto prazo. Outro termo também muito utilizado é a divisão do planejamento de mineração em: plano estratégico, plano tático e plano operacional. A Tabela 1 mostra a relação entre esses termos e os períodos de utilização de cada tipo de plano.

Tabela 1 - Horizontes de tempo para os diferentes tipos de planejamento de lavra.

Tipo de Planejamento	Horizonte de Tempo (períodos)
Planejamento Estratégico	Vida da mina Quinquenal (5 anos)
Planejamento Tático	Anual Trimestral/Mensal
Planejamento Operacional	Semanal Diário/Turno

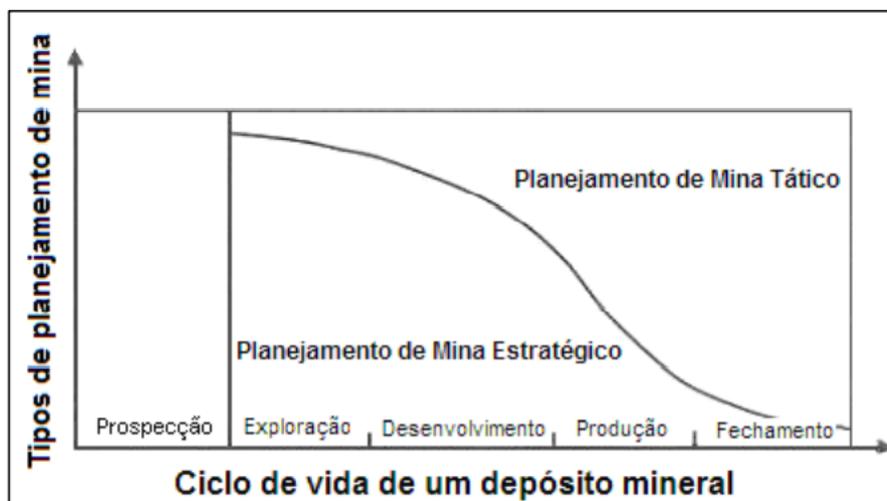
Fonte: Candido (2012, p.20).

Segundo Bazante (2004), a principal diferença entre os três tipos de planejamento apresentados na Tabela 1 é o fator tempo. Assim, o planejamento estratégico aborda questões relativas ao futuro do negócio, com foco no que se espera que aconteça nos próximos anos. O tático interpreta as decisões estratégicas e desenvolve planos realistas e acionáveis a serem implementados

nos próximos meses, ou no máximo um ano. E o operacional implanta táticas em ações de curto prazo, desde planos semanais até ações ou turnos diários.

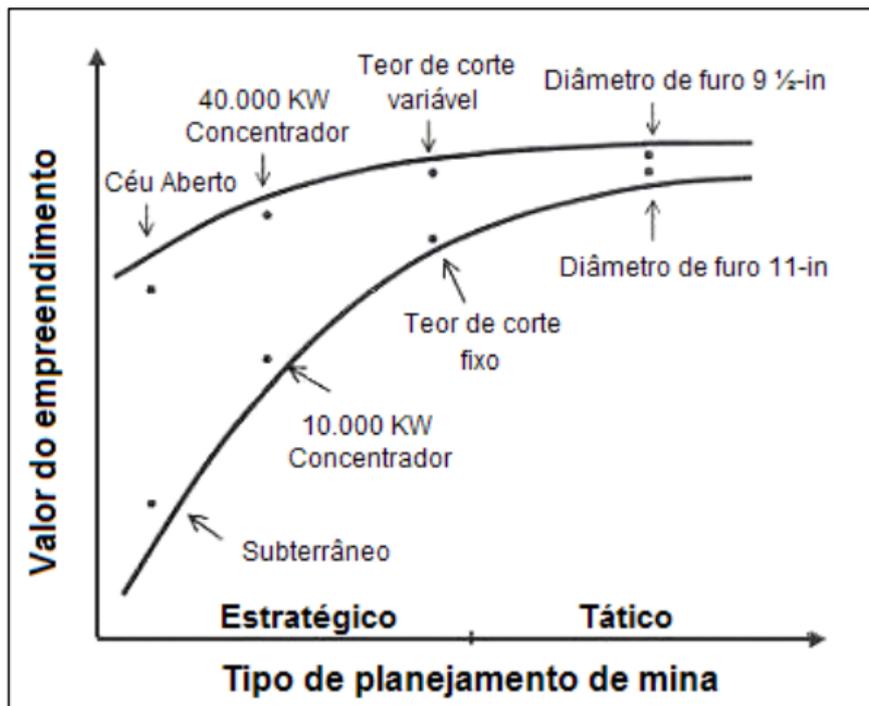
Camus (2003) define o planejamento estratégico e tático conforme mostrado nas Figuras 5 e 6. Primeiro, o planejamento estratégico e tático faz parte de uma série constante. O planejamento estratégico deve ser revisto ou refeito a cada ano dependendo do mercado, modernidade e evolução tecnológica (Figura 5). Em segundo lugar, o planejamento estratégico determina o valor da empresa (Figura 6).

Figura 5 - Planejamento estratégico e tático no ciclo de vida da mina.



Fonte: Camus (2003).

Figura 6 - Planejamento estratégico e tático.



Fonte: Camus (2003).

Esta fase também inclui análise de sensibilidade e análise de risco para as variáveis de projeto mais relevantes relacionadas a mudanças nas condições externas e internas, como mudanças nos preços do minério, mudanças nos preços do minério, mudança no custo, mudança de teor/estoque, metalurgia de recuperação, ângulo de inclinação geotécnica, etc (FLORES, 2008).

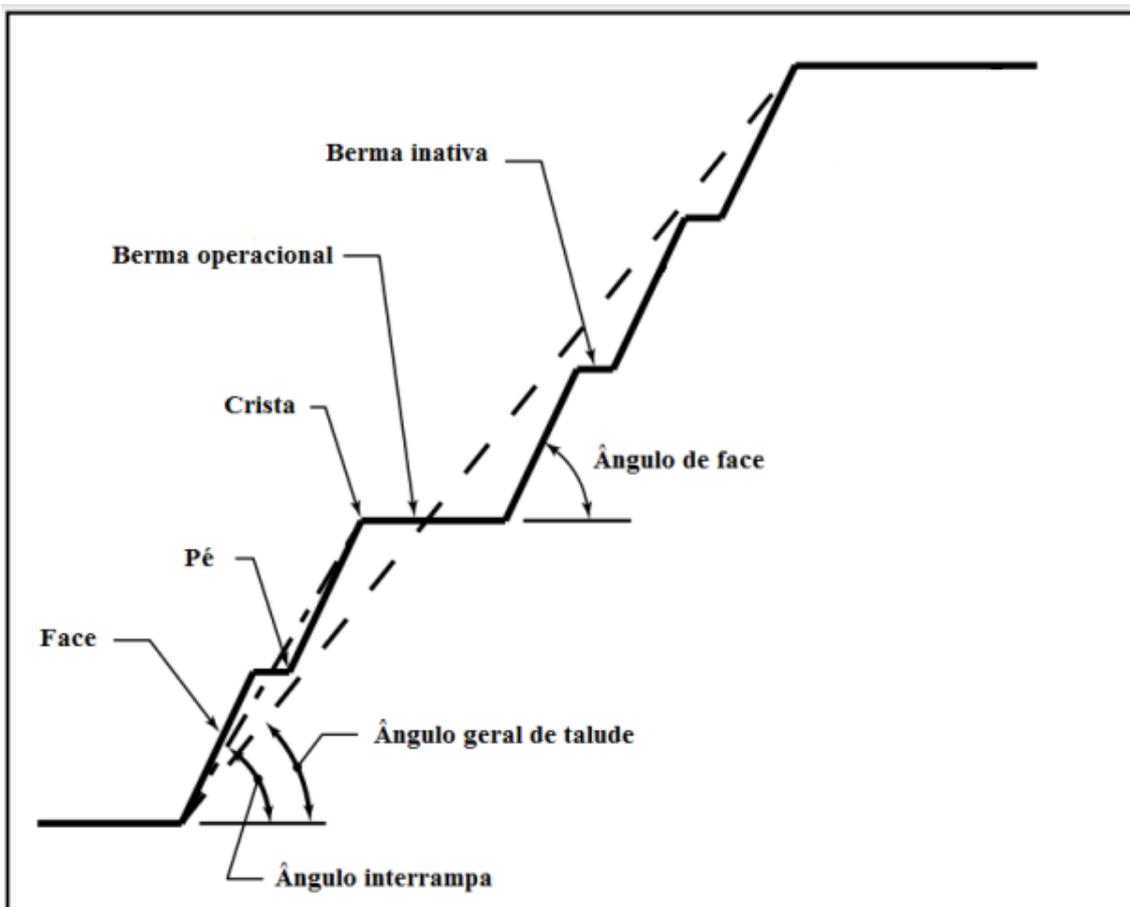
Candido (2012) afirma que as considerações estratégicas não devem se limitar às decisões tomadas nos estágios iniciais do ciclo de vida de uma empresa de mineração, mas devem ser integradas ao processo de planejamento relevante, a todos os outros estágios de desenvolvimento da sua vida útil. Isso garante a atemporalidade do planejamento estratégico, permite a manutenção de um banco de dados atualizado e permite que novas situações e cenários que surgem ao longo do tempo sejam considerados do ponto de vista estratégico no processo de tomada de decisão.

2.8 Geometria da Cava

De acordo com Armstrong (1990), os principais fatores que afetam o projeto da cava são: geologia da mina, distribuição do teor, extensão do corpo de minério, topografia, taxa de produção, ângulo de inclinação, custo e benefício da lavra, recuperação do minério, teor de corte, etc. A maior ou menor relevância de cada um dependerá do projeto em análise. No entanto, é importante entender bem esses fatores para que possam ser incorporados ao planejamento da mina.

Considerando apenas os parâmetros geométricos, em geral, a cava de uma mina a céu aberto pode ser descrita pelos ângulos de inclinação dos taludes, altura dos bancos e pela largura das bermas. A Figura 7 mostra os principais elementos que compõem um talude típico de uma mina, tais como: bermas ativas e inativas; a face do talude, a crista e o pé do talude, bem como os ângulos da face e o ângulo geral da cava (NETO, 2017).

Figura 7 - Representação dos principais elementos de um talude.



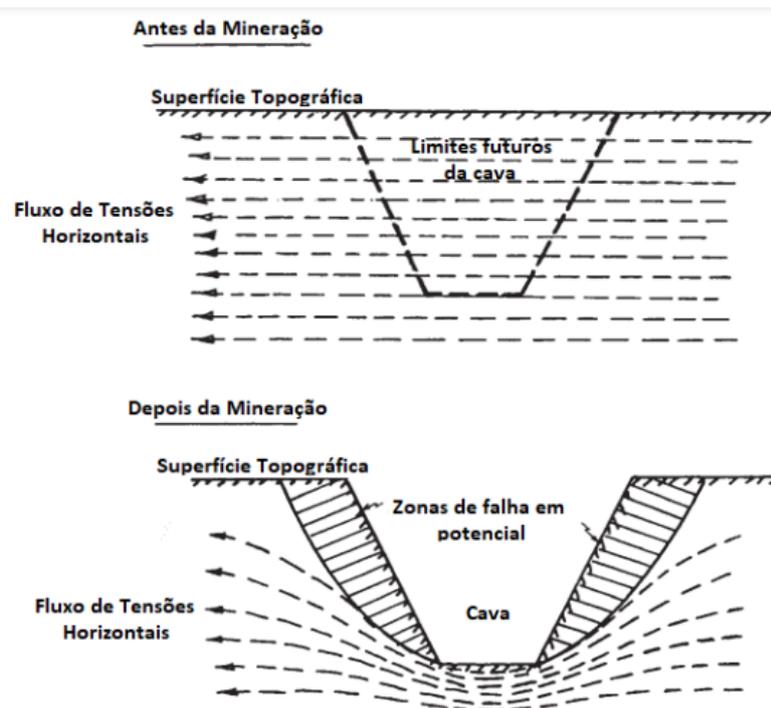
Fonte: Neto (2017, p. 39).

2.9 Considerações Geotécnicas

A engenharia geotécnica requer a aplicação dos princípios da mecânica dos solos, mecânica das rochas, engenharia geológica e outros campos e disciplinas afins, estabelecidos principalmente no campo da engenharia civil e minas (Brady e Brown, 2006).

Segundo Hustrulid et al., (2013), a escavação da cava desequilibra o estado de tensão do maciço rochoso. Como resultado, o fluxo de tensões horizontais pré-existentes tende a se reorganizar, sendo forçados a movimentar-se pelo fundo da cava e ignorando os limites da cava final. As tensões verticais também tendem a diminuir devido à remoção do material contido na cava. Isso leva ao aparecimento de uma zona de estiramento de tensão localizada entre a linha de fluxo de tensão horizontais e o limite interno da cava. Essa liberação de tensões promove a expansão de estruturas como juntas e falhas, reduzindo assim as forças de coesão e atrito das rochas dentro do maciço. À medida que a cava **se** aprofunda, essa zona de relevo tende a aumentar, o que também aumenta a gravidade de possíveis fissuras no maciço. A Figura 8 mostra a redistribuição do fluxo de tensão devido à escavação do poço de fundação.

Figura 8 - Redistribuição das tensões horizontais devido a escavação da cava.



Fonte: Neto (2017, p.44).

2.10 Métodos de Avaliação Econômica de um Projeto

O objetivo básico da avaliação econômica de projetos de investimento é fornecer um fator quantitativo muito importante para a tomada de decisão. As decisões de investimento devem ser tomadas com base em análises amplas, levando em consideração aspectos técnicos, econômicos, financeiros, de risco e intangíveis (fatores não quantificáveis, como: incerteza, política, regras econômicas explícitas, opinião pública, meio ambiente, etc....).

Segundo Girodo e Pinto (2006) a maioria das decisões financeiras em geral, e na área mineral em particular:

“... são embasadas no conceito de fluxo de caixa descontado o valor presente líquido dos fluxos de caixa, gerados pelo projeto, após a fixação da taxa interna de retorno avaliada após da taxação correspondem a parâmetros que suportam tomadas de decisão de ir avante o projeto. Isto posto, a construção do modelo econômico-financeiro apropriado o entendimento de conceitos de

contabilidade, legislação fiscal e do denominado valor do dinheiro no tempo ou fluxos de caixa descontados...”.

Construir um modelo adequado também requer conhecer a estrutura do projeto que está sendo estudado, a tecnologia e os custos envolvidos, informações de mercado do que é produzido, etc. A indústria de mineração muitas vezes envolve um longo período de maturidade e muito esforço na concepção e implementação, e por isso, entender a evolução ao longo do tempo de todas as ações e fluxos de caixa é essencial. Como é impossível prever o futuro com precisão, os modelos estão sempre em desacordo com a realidade.

2.10.1 Valor Presente Líquido (VPL)

No método do VPL, o valor presente líquido do sequenciamento de lavra é calculado utilizando a taxa de atratividade mínima (TMA). Logo, se o valor do cálculo do VPL for maior ou igual a zero, a proposta de investimento é atrativa.

O VPL do sequenciamento de lavra representa a estimativa da rentabilidade econômica de um projeto de lavra, sendo calculado pela diferença entre as receitas provenientes da extração mineral e os custos totais envolvidos na operação, todos atualizados a valor presente por meio de uma taxa de desconto apropriada (Hustrulid; Kuchta, 2013). Um VPL positivo significa que o valor futuro, descontado na TMA, supera o investimento necessário, o que torna a proposta atrativa. Por outro lado, um valor presente negativo significa que a empresa está investindo mais do que receberá, o que é indesejável.

O VPL pode ser determinado através da Equação 4:

Equação 4 - Equação do VPL.

$$VPL = \sum_{n=1}^n FC_n / (1 + i)^n$$

Onde:

- i = taxa mínima de atratividade (TMA);
- FC_n = fluxo de caixa no ano n ;

- VPL = soma dos valores presentes das entradas e saídas de caixa do projeto.

2.11 Incertezas e Riscos na Mineração

A avaliação econômica de projetos de mineração é influenciada por incertezas geológicas, técnicas e econômicas. A incerteza geológica está relacionada à quantidade e qualidade das informações disponíveis e à falha em representar plenamente os fenômenos naturais por meio de modelos determinísticos. As incertezas técnicas estão relacionadas a fatores específicos do projeto, como o caminho da tecnologia adotada, o tipo e o tamanho do equipamento e os parâmetros e custos operacionais. Por outro lado, as incertezas econômicas decorrem da demanda de mercado e dos preços dos ativos minerais, cenários econômicos e outros fatores externos que afetam custos e investimentos.

Segundo **GODOY** (1998) a incerteza na interpretação geológica e na estimativa de parâmetros está relacionada a diversos fatores, como efeito da mudança de suporte, amostras insuficientes, técnicas de amostragem ou preparação deficientes, erros de interpolação no processo, modelagem de blocos, efeito de suavização do interpolador, entre outros. Seja qual for o motivo, é importante perceber que não existe um modelo de bloco perfeito, no sentido de que sempre haverá incerteza associada a ele. É importante estar ciente dessa incerteza e dos riscos que a acompanham.

Garcia (2003) divide a incerteza em duas famílias; fatores técnicos e econômicos. As incertezas econômicas dependem de fatores exógenos, como recessão, guerra, descoberta de novas tecnologias, desastres naturais, etc. As incertezas técnicas não estão relacionadas a movimentos macroeconômicos e podem ser atenuadas por investimentos como perfuração para reduzir a instabilidade geológica. Segundo Garcia, a complexidade e a quantidade de variáveis de risco que interferem no processo de mineração tornam as decisões dos investidores extremamente difíceis.

Segundo Potvin (2006), a noção de que, de forma previsível e global, o potencial de uma determinada mineradora é um fator importante para o seu sucesso. Portanto, o planejamento estratégico para uma extração eficiente é essencial para extrair o maior retorno possível do potencial apresentado e assim garantir o maior retorno e racionalidade de todos. Para cada projeto de mineração, os riscos estratégicos devem ser avaliados e controlados, incluindo principalmente:

- Riscos geológicos: mais comumente relacionados à contabilização de teores e tonelagens, estimados em inventários e relatórios das reservas lavráveis, ou remanescentes;
- Riscos financeiros: relacionados às projeções de preços dos produtos e custos fixos e variáveis, durante a vida útil do empreendimento;
- Riscos metalúrgicos: relacionados à representatividade dos modelos projetados para a recuperação do minério, na usina de beneficiamento;
- Riscos geomecânicos: relacionados aos controles do maciço em resposta à lavra, podendo potencialmente gerar condições inseguras, encarecimento por re-trabalho e reabilitação, maiores diluições e menores recuperações da lavra do minério, além de atrasos na produção;
- Riscos de engenharia: relacionados às falhas e ineficiências na concepção e implementação de sistemas, de modo a não alcançar as metas inicialmente projetadas;
- Riscos ambientais: relacionados ao não cumprimento de metas e premissas acordadas com os órgãos de fiscalização ambiental competentes.
- Riscos sócio-políticos: relacionados a contextos locais específicos, onde podem ocorrer restrições à lavra, em diversos níveis e períodos, principalmente por motivos culturais, sociais e políticos.
- Riscos administrativos e gerenciais: relacionados à perda de controle, monitoramento e referência, que conduzem ao não cumprimento de normas e objetivos pré-estabelecidos.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de analisar os efeitos da oscilação das variáveis econômicas dos minérios de ouro e de cobre através dos limites da cava final ótima nos períodos pré e pós-pandemia. Portanto, para cada cenário gerado, são analisados o volume de minério, estéril e a REM, assim como uma análise econômica baseada no VPL da cava **com** o objetivo de verificar a influência do preço e dos custos de lavra no valor do projeto.

3.1 Modelo de Blocos

A primeira etapa do método aplicado consiste no carregamento do modelo de blocos de ouro e cobre e sua posterior avaliação. Para isso, o modelo de bloco da mina em estudo foi inserido **no** software NPVS. Nesta etapa é possível identificar os diferentes tipos de minério e também de estéril que estão presentes no modelo de blocos.

3.2 Modelo Econômico

3.2.1 Função Benefício

Então, foi elaborada a função benefício. Os blocos foram avaliados segundo este critério econômico, recebendo valores da função benefício. É nessa fase que são feitos ajustes na influência do preço de mercado do ouro e do cobre, assim como os seus custos de exploração e processamento, sobre o planejamento da cava para criar os diferentes cenários estudados.

3.2.2 Histórico de Preço

A definição do histórico de preços consistente é uma etapa fundamental na construção de qualquer modelo econômico aplicado ao planejamento de lavra. Considerando a sensibilidade do VPL aos preços das *commodities*, a metodologia adotada neste trabalho contempla uma análise baseada em médias

históricas. Essa abordagem busca atenuar os efeitos das oscilações pontuais do mercado e fornece uma base mais estável para simulação dos cenários pré e pós-pandemia.

3.2.3 Custos

A significativa variação observada nos custos de mineração entre os períodos pré e pós-pandemia está diretamente relacionada a um conjunto de fatores econômicos e logísticos que impactaram globalmente o setor mineral. No período pós-pandemia, houve um aumento expressivo nos custos operacionais devido à elevação dos preços de combustíveis, insumos e energia elétrica — componentes críticos das atividades de lavra. Além disso, interrupções nas cadeias de suprimentos, escassez de mão de obra qualificada e reajustes salariais pressionaram ainda mais os custos totais das operações.

De acordo com o relatório *Mine 2022: A Critical Transition*, publicado pela PwC, mesmo com receitas recordes registradas no setor em 2021, os custos operacionais aumentaram de maneira significativa, refletindo uma combinação de inflação global e gargalos logísticos em escala mundial. Essa tendência também foi destacada por análises da *Mining.com*, que evidenciam a elevação das despesas operacionais em diversas mineradoras, impulsionada por fatores como a alta no diesel e nos explosivos, além da dificuldade de obtenção de peças e equipamentos pesados.

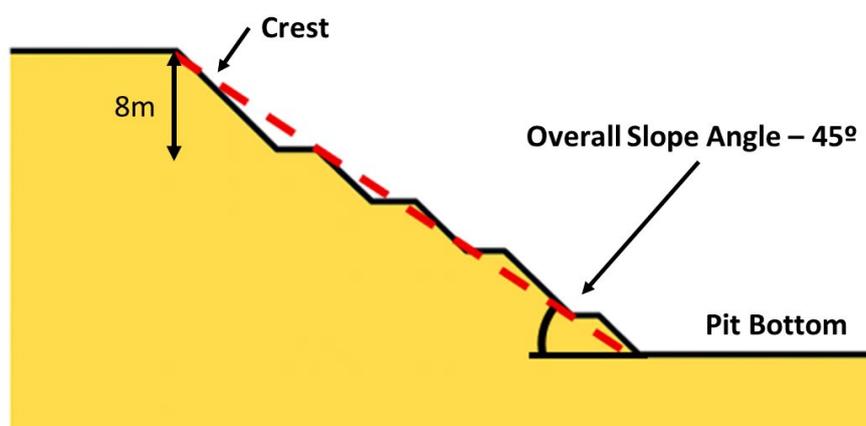
3.3 Modelo Geotécnico

O modelo geotécnico foi construído com base na definição dos ângulos de inclinação dos taludes aplicados a cada região do modelo de blocos. Esses ângulos foram determinados considerando critérios de estabilidade geotécnica compatíveis com as características litológicas e estruturais do maciço rochoso, assegurando a segurança das operações de lavra.

Para a implementação do modelo geotécnico no *software*, foi utilizado o parâmetro “*Inter Region Slope Check*”, com um filtro de 8x8 e orientação de

azimute em 0° , resultando em um ângulo global de talude de 45° . A Figura 9 ilustra de maneira esquemática como esse parâmetro foi aplicado, representando a inclinação dos taludes da cava final conforme inserido no modelo. Essa configuração influencia diretamente a geometria da cava, afetando a relação estéril/minério (*strip ratio*) e, conseqüentemente, a viabilidade técnica e econômica do projeto.

Figura 9 - Parâmetros de Inclinação



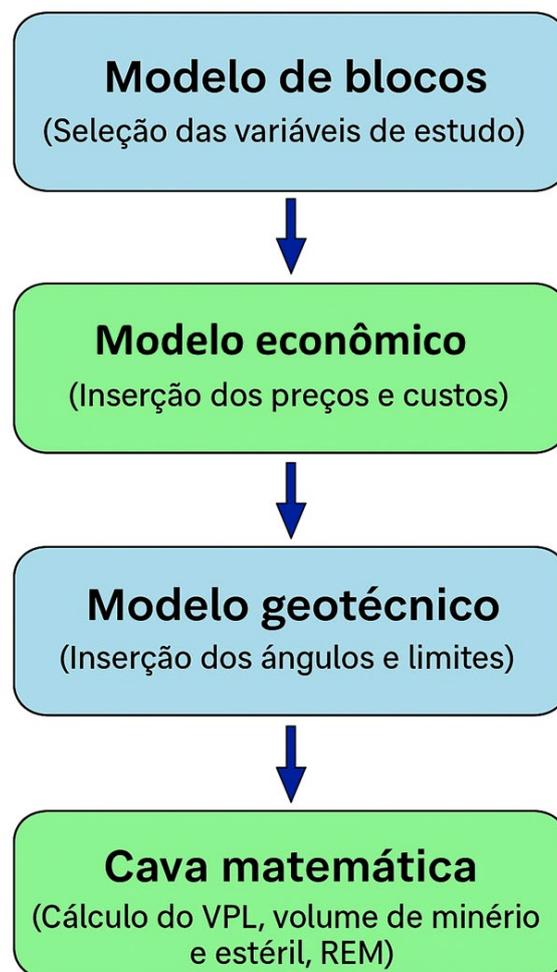
3.4 Cava Final

A delimitação da cava final envolve não apenas critérios econômicos, mas também a consideração de restrições físicas e operacionais que refletem os limites reais da lavra. Neste estudo, foram inseridas restrições geográficas relacionadas aos limites da propriedade e da área de locação, assegurando que a cava respeite os contornos legais do empreendimento. Além disso, foi adotada uma cota mínima de 740 metros para o fundo da cava, evitando o aprofundamento excessivo em regiões que poderiam comprometer a viabilidade técnica, geotécnica ou ambiental do projeto. Depois de inserir esses parâmetros, o *software* NPVS fornece os contornos da cava otimizados finais. Restrições físicas, como limites de propriedade e de cota, também foram integradas ao modelo. A partir dessas informações, o *software* gerou os contornos otimizados da cava.

A metodologia foi aplicada a dois cenários distintos. No **Cenário I**, considerou-se a valoração dos minérios de ouro e cobre durante o período Pré-pandemia (2015 a 2019), assim como os custos de processo e operacionais. Já no **Cenário II**, as análises foram feitas considerando o preço dos minérios de ouro e cobre no período Pós-pandemia (2020 a 2024), também levando em conta os custos de processamento do minério e os custos operacionais.

Por fim, um fluxograma (Figura 10) foi elaborado para representar os passos da metodologia aplicada nos dois cenários, da seguinte maneira: Modelo de blocos – (seleção das variáveis de estudo) – Modelo econômico (Inserção dos preços e custos) – Modelo geotécnico (Inserção dos ângulos e limites) – Cava matemática (Cálculo do VPL, volume de minério e estéril, REM)

Figura 10 - Fluxograma das Etapas do Trabalho.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia descrita. Foram analisados os impactos que a variação nos preços das *commodities* de ouro e cobre refletem na cava final, com foco em variáveis críticas como o VPL, volume de minério e estéril, REM.

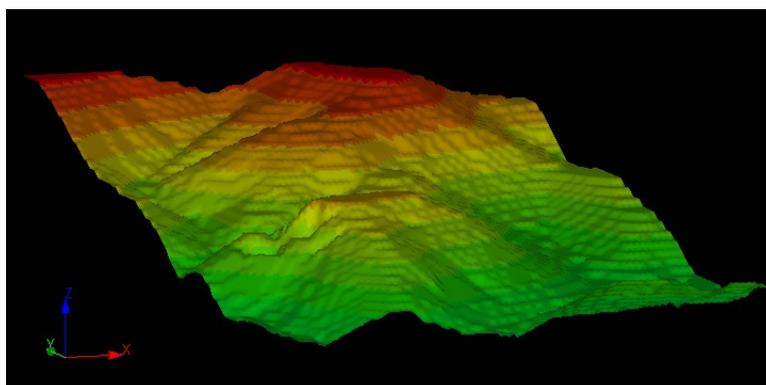
4.1 Pré Pandemia

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos a partir dos parâmetros econômicos e operacionais simulados para o período pré-pandemia (2015–2019).

4.1.1 Topografia Inicial

A topografia inicial da área de estudo, gerada pelo software NPV Studio da Datamine, é utilizada como base para a definição da cava final. Essa etapa é crucial para a inserção de restrições físicas no planejamento, garantindo que as operações respeitem as condições geográficas e geomorfológicas do local. A Figura 11 mostra a topografia da área de estudo.

Figura 11 - Topografia Inicial da Área de Estudo.



4.1.2 Modelo de Blocos

O modelo de blocos contém informações detalhadas sobre as características físicas e geométricas da jazida e apresenta a classificação dos minerais presentes na jazida (estéril, oxidado e sulfetado), além de outras características relevantes para o planejamento de lavra. As Figuras 12 e 13 mostram o modelo de blocos gerado pelo *software NPVS*, que foi utilizado para a realização deste trabalho, em duas diferentes vistas.

Figura 12 - Modelo de Blocos Estudado – Vista em Corte.

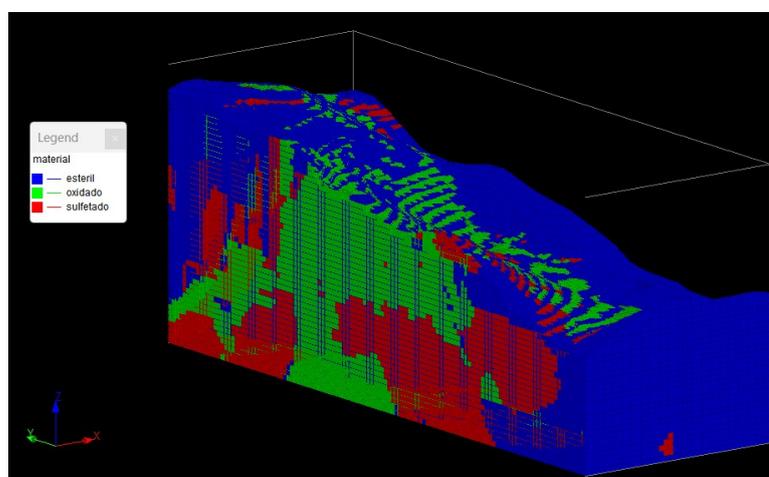
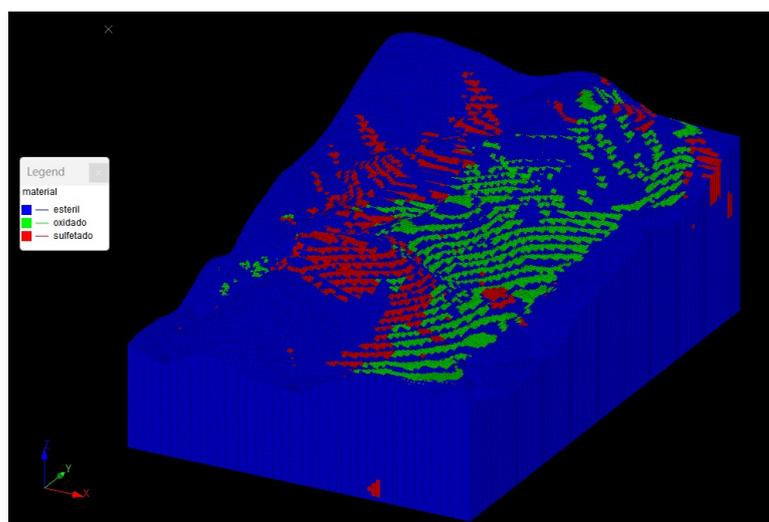


Figura 13 - Modelo de Blocos Estudado.



Este modelo é essencial para determinar as áreas de lavra mais lucrativas e para

o sequenciamento adequado. As principais estatísticas do modelo de blocos estão descritas nas Tabelas 2 a 6:

A Tabela 2 mostra o número de células presentes sob a topografia.

Tabela 2 - Células sob a Topografia

<i>Cells under Topography</i>	321,078
--------------------------------------	----------------

A Tabela 3 mostra o número, tamanho e origem dos blocos presentes em cada um dos eixos (X,Y, e Z).

Tabela 3 - Número de blocos em cada eixo.

Eixo	Block Count	Block Size	Origin
X	80	10	4,700
Y	120	10	10,000
Z	50	10	1,800

A Tabela 4 indica as estatísticas globais do modelo de blocos do período Pré-pandemia.

Tabela 4 - Estatísticas Globais – Modelo de Blocos – Pré-pandemia.

Global Stats		
	tonnes	cu.m
Ore	411,166,011	165,629,449
Waste	268,530,398	149,183,554
Total	679,696,409	314,813,004

A Tabela 5 mostra as densidades máxima e mínima do modelo de blocos.

Tabela 5 - Densidades Mínima e Máxima.

	Minimum	Maximum
Density	1.8	2.61

A Tabela 6 apresenta as informações gerais sobre os minérios oxidado e sulfetado e sobre o estéril presentes no modelo.

Tabela 6 - Informações Gerais sobre os Minérios Oxidado e Sulfetado, e Estéril.

Parâmetro	Oxidado (Oxide)	Sulfetado (Sulfide)	Estéril (Waste)
Código	1	2	0
Tonelagem (tonnes)	182,971,793	228,194,218	268,530,398
Volume (m³)	70,754,602	94,874,847	149,183,554
AU (g/tonne)	0.4269	0.277	0
AU Mínimo (g/tonne)	0.0022	0.0011	0
AU Máximo (g/tonne)	7.7449	5.7188	0
AU Intervalo (g/tonne)	7.7427	5.7177	0
CU (% peso)	0.15%	0.08%	0.00%
CU Mínimo (%)	0.02%	0.00%	0.00%
CU Máximo (%)	3.02%	1.90%	0.00%
CU Intervalo (%)	3.01%	1.90%	0.00%

Oxidado (Oxide):

O material Oxidado (Oxide) representa um total de 182.971.793 toneladas, correspondentes a um volume de 70.754.602 m³. O teor médio de ouro (AU) presente nesse material é de 0,4269 g/tonelada, com uma variação que vai de 0,0022 g/tonelada até 7,7449 g/tonelada, indicando uma significativa variabilidade na distribuição do metal precioso dentro do corpo mineralizado. Em relação ao cobre (CU), observa-se um teor médio de 0,15%, com valores variando entre 0,02% e 3,02%, o que também evidencia a presença de zonas com concentrações diferenciadas deste minério. A ampla faixa de teores de ouro, com diferença de até 7,7427 g/tonelada entre os valores mínimo e máximo,

reforça a necessidade de um planejamento seletivo na lavra, a fim de otimizar a recuperação econômica do depósito.

Sulfetado (*Sulfide*):

O material Sulfetado (*Sulfide*) corresponde a um total de 228.194.218 toneladas, ocupando um volume de 94.874.847 m³. O teor médio de ouro (AU) presente nesse tipo de minério é de 0,277 g/tonelada, com uma variação que oscila entre 0,0011 g/tonelada e 5,7188 g/tonelada, indicando uma distribuição menos concentrada deste minério em comparação com outros tipos de materiais. No que se refere ao cobre (CU), o teor médio é de 0,08%, com valores variando de 0,00% a 1,90%. De modo geral, o minério sulfetado apresenta teores médios de ouro e cobre inferiores aos encontrados no material oxidado, o que implica em desafios adicionais para a viabilidade econômica de sua exploração, exigindo maior seletividade e eficiência nos processos de beneficiamento.

Estéril (*Waste*):

O Estéril (*Waste*) corresponde à maior proporção de material presente no depósito, totalizando 268.530.398 toneladas, distribuídas em um volume de 149.183.554 m³. Este material não possui concentrações economicamente viáveis de ouro (AU) ou cobre (CU), sendo, portanto, classificado como sem valor econômico direto. Em função dessa característica, todo o material estéril é destinado exclusivamente às áreas de deposição, como pilhas de estéril, representando um dos principais desafios operacionais e ambientais no planejamento da lavra, já que sua movimentação gera custos sem retorno financeiro associado.

4.1.3 Modelo Econômico

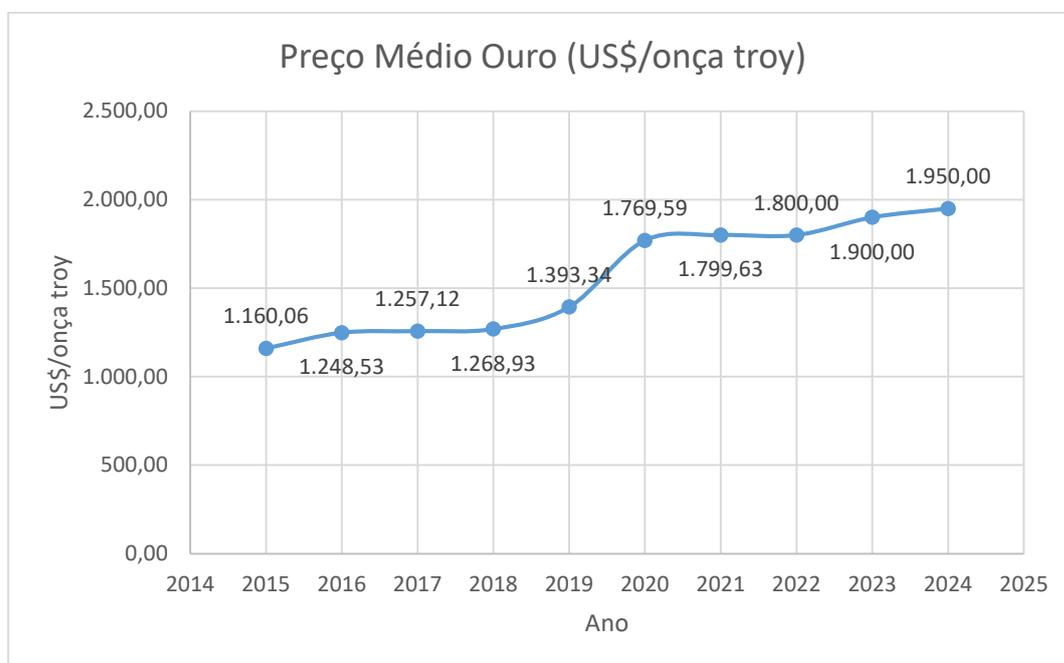
4.1.3.1 Histórico de Preço

O gráfico da Figura 14 mostra a mudança nos preços médios do ouro de 2015 a 2024. O ano de 2025 foi excluído desta análise porque todos os seus

valores de preço eram desconhecidos até a data de conclusão da obra. Portanto, a análise das médias anuais é realizada em um intervalo de dez anos.

No período pré-pandemia (2015–2019), o ouro apresentou um aumento gradual no valor de mercado, passando de aproximadamente US\$ 1.160,06/oz troy em 2015 para US\$ 1.393,34/oz troy em 2019, o que representa um crescimento acumulado de cerca de 20,1% ao longo de cinco anos, ou uma média anual de aproximadamente 4,7%. Essa evolução reflete uma valorização constante, em linha com a demanda estável por ativos seguros em um contexto econômico relativamente previsível. Já no período pós-pandemia (2020–2024), observou-se um aumento expressivo, com o preço médio do ouro subindo de US\$ 1.769,59/oz troy em 2020 para US\$ 1.950,00/oz troy em 2024, um crescimento acumulado de 10,2%, evidenciando os efeitos da instabilidade econômica global, da inflação e da incerteza nos mercados. Esse comportamento reforça o papel do ouro como um ativo de proteção em cenários de crise e volatilidade.

Figura 14 – Médias Anuais dos Preços do Ouro – Períodos Pré e Pós-pandemia.



Com base nesses dados históricos apresentados na Figura 14, foram calculadas as médias dos preços do ouro para dois intervalos distintos: o período pré-pandemia (2015 a 2019), que resultou em um valor médio de US\$ 40,70/g e

o período pós-pandemia (2020 a 2024), com média de US\$ 59,28/g. Esses valores médios foram adotados como referência para a construção do modelo econômico, permitindo uma comparação entre os cenários de planejamento de lavra sob diferentes condições macroeconômicas. O uso das médias evita distorções provocadas por picos ou quedas atípicas e fornece uma base mais estável e representativa para as simulações realizadas no estudo.

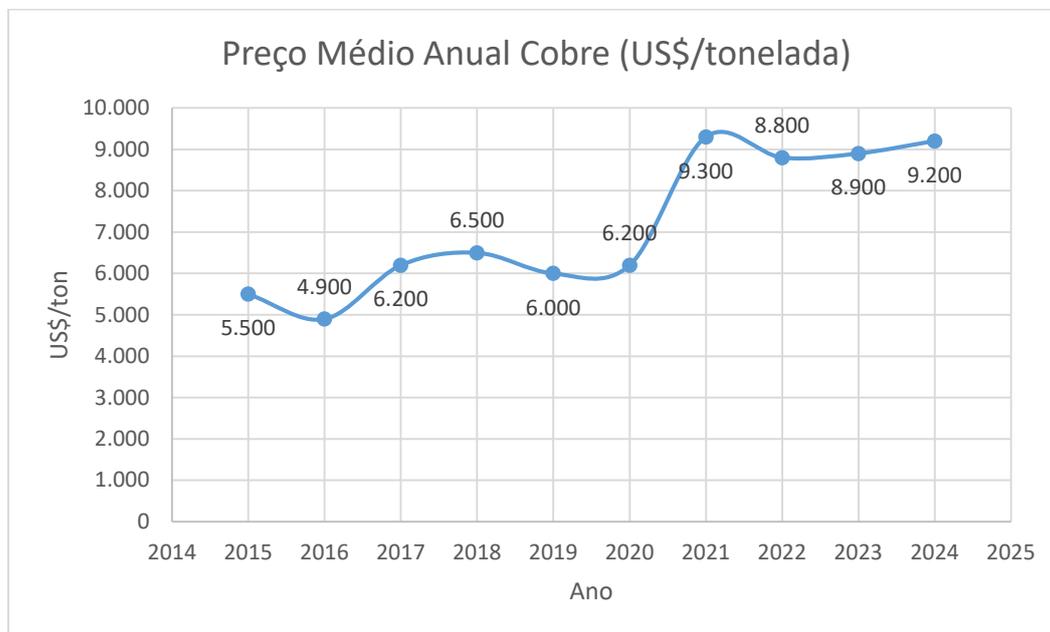
O gráfico da Figura 15 mostra a mudança nos preços médios do cobre de 2015 a 2024. O ano de 2025 foi excluído desta análise porque todos os seus valores de preço eram desconhecidos até a data de conclusão da obra. Portanto, a análise das médias anuais é realizada em um intervalo de dez anos.

No período pré-pandemia (2015–2019), o preço do cobre apresentou variações moderadas, com uma leve tendência de valorização ao longo dos anos. Em 2015, o preço médio foi de US\$ 5.500/tonelada, atingindo US\$ 6.000/tonelada em 2019, o que representa um crescimento acumulado de 9,1% nesse intervalo. Essa oscilação relativamente estável reflete um mercado ajustado ao equilíbrio entre oferta e demanda em um cenário econômico global mais previsível.

Já no período pós-pandemia (2020–2024), os preços sofreram um salto expressivo. Partindo de US\$ 6.200/tonelada em 2020, o valor médio atingiu US\$ 9.200/tonelada em 2024, configurando um aumento acumulado de aproximadamente 48,4% em apenas quatro anos. Esse crescimento acentuado evidencia o impacto da retomada industrial global, o avanço da transição energética (com maior demanda por cobre em tecnologias verdes) e a instabilidade nas cadeias de suprimentos. Tal valorização reforça o papel

estratégico do cobre no cenário econômico contemporâneo e justifica sua importância na análise de viabilidade econômica de projetos de mineração.

Figura 15 – Médias Anuais dos Preços do Cobre – Períodos Pré e Pós-pandemia.



A partir da análise dos dados apresentados na Figura 15, foram definidas duas médias representativas para os preços do cobre: um referente ao intervalo de 2015 a 2019 (pré-pandemia), com valor médio de aproximadamente US\$ 5.820,00 por tonelada, e outra para o período de 2020 a 2024 (pós-pandemia), com média em torno de US\$ 8.480,00 por tonelada. Essas médias foram fundamentais para embasar o modelo econômico, refletindo as condições reais de mercado em momentos distintos. A separação dos períodos permitiu considerar os efeitos diretos das variações econômicas globais sobre o preço do cobre, assegurando maior coerência na comparação entre os cenários simulados. A utilização desses valores suaviza variações pontuais e proporciona maior confiabilidade nas projeções do planejamento de lavra.

4.1.3.2 Custos

O relatório Mine 2022 (*A Critical Transition* publicado pela PwC) evidenciou a adoção de um custo de mineração mais elevado no cenário pós-pandemia — US\$ 24,61/tonelada, em comparação aos US\$ 10,42/tonelada do

período pré-pandemia — reflete uma adaptação realista e coerente aos novos desafios econômicos enfrentados pela indústria mineral global.

Foi aplicada uma taxa mínima de atratividade de 10% - Este valor foi escolhido com base no Portal Lume da UFRGS, que utiliza essa taxa em análises econômicas de projetos de depósitos de ouro - e uma produção média de 3 milhões de toneladas de minério por ano.

4.1.3.3 Modelo econômico - Pré-Pandemia

O modelo econômico gerado pelo *software* NPV Studio da Datamine fornece uma visão detalhada das destinações de material (pilha de estéril, lixiviação e moagem) com base nos parâmetros econômicos e operacionais. Este modelo é fundamental para avaliar a viabilidade econômica e as estratégias de maximização de valor da operação.

As Tabelas 7 e 8 representam os *inputs* que foram utilizados para a realização do modelo econômico:

Tabela 7 - Preços utilizados de ouro e cobre pré-pandemia.

Prices		
	Price	Selling Cost
AU	40,70	0.0000
CU	5.820,00	0.0000

Os preços de mercado e os custos de venda dos minérios são fatores determinantes na avaliação econômica de qualquer projeto de mineração. Para este estudo, o preço do ouro (AU) foi considerado em US\$ 40,70 dólares por grama, enquanto o preço do cobre (CU) foi fixado em US\$ 5.820,00 dólares por tonelada. Esses valores foram definidos com base na média dos preços praticados ao longo dos cinco anos anteriores ao período da pandemia, refletindo uma visão mais estável e representativa das condições de mercado pré-pandemia. A utilização dessa média histórica busca evitar distorções causadas

por oscilações pontuais, proporcionando uma base sólida para as análises econômicas. Esses preços são cruciais para a definição das margens operacionais e para o cálculo dos pontos de equilíbrio econômico, influenciando diretamente a viabilidade do projeto e a tomada de decisão quanto à extração e processamento dos recursos minerais.

A Tabela 8 apresenta os valores utilizados referentes ao custo de exploração por tonelada, diluição dos minérios e a recuperação total, no período pré-pandemia.

Tabela 8 - Mining Reference.

Mining Reference		
Cost	Dilution	Recovery
\$/tonne		
10.4200	10.0000%	97.0000%

Os custos de mineração, juntamente com os índices de diluição e recuperação, são elementos essenciais para a análise da viabilidade econômica de um projeto mineral. Neste estudo, o custo de mineração foi estimado em US\$ 10,42 dólares por tonelada, valor que reflete as despesas associadas à extração do material. A diluição foi considerada em 10,00%, o que indica a quantidade de material não mineralizado que inevitavelmente é incorporada ao minério durante o processo de lavra, reduzindo a qualidade do material extraído. Por outro lado, a recuperação foi fixada em 97,00%, representando a eficiência do processo de beneficiamento na recuperação dos metais de interesse. Esses três parâmetros são determinantes para o cálculo do lucro operacional, pois afetam diretamente tanto a quantidade de material aproveitável quanto os custos envolvidos em sua extração e processamento.

A Tabela 9 mostra os *inputs* utilizados para a definição dos ajustes de bancadas.

Tabela 9 – Ajustes de Bancada.

Bench Adjustments	Default	mill	leach	
Reference Bench	8	8	8	
Adjust Above	0.0100	0.0100	0.0100	\$/bench
Adjust Below	0.0150	0.0150	0.0150	\$/bench

Os ajustes de bancada (*Bench Adjustments*) são parâmetros aplicados para considerar variações nos custos operacionais conforme a profundidade da lavra. Neste estudo, foi adotada uma referência de 8 bancadas para os modos *Default*, *Mill* e *Leach*, servindo como base para o cálculo dos custos adicionais. A cada bancada acima da referência, aplica-se um ajuste de US\$ 0,0100 dólares por bancada, enquanto para cada bancada abaixo da referência, o ajuste é de US\$ 0,0150 dólares por bancada. Esses valores refletem o aumento progressivo dos custos operacionais à medida que a lavra se aprofunda, devido a fatores como maior distância de transporte, ventilação, drenagem e complexidade operacional, impactando diretamente a viabilidade econômica do projeto.

A Tabela 10 apresenta os custos e parâmetros utilizados para a recuperação do minério oxidado, durante o período pré-pandemia.

Tabela 10 – Custos e parâmetros de recuperação para oxidados.

Processing oxide			
	mill	leach	Unit
ORE Cost	6.0000	2.5500	\$/tonne
AU Cost	0.0000	0.0000	\$/g
CU Cost	180	190	\$/tonne
AU Recovery	0.8000	0.0000	fraction
CU Recovery	Formula 1	0.6500	fraction
AU Economic COG	0.1941	-	g/tonne
CU Economic COG	0.1579%	0.0718%	Percent

O processamento de minérios oxidados apresenta custos e parâmetros de recuperação distintos para os métodos de moagem (*Mill*) e lixiviação (*Leach*).

O custo de processamento do minério é de US\$ 6,00 dólares por tonelada para o método *Mill* e US\$ 2,55 dólares por tonelada para o método *Leach*. No caso do cobre (CU), o custo associado é de US\$ 180 dólares por tonelada no *Mill* e US\$ 190 dólares por tonelada no *Leach*. A recuperação de ouro (AU) ocorre apenas no processo de moagem, com uma eficiência de 80%, enquanto a recuperação de cobre é realizada exclusivamente na lixiviação, com uma taxa de 65%. Além disso, o corte econômico (COG) para o ouro no *Mill* é de 0,1941 g/tonelada, e para o cobre, 0,1579%. Esses parâmetros são essenciais para definir a viabilidade do processamento, indicando os limites mínimos de teor que justificam economicamente o tratamento do minério em cada método.

A Tabela 11 mostra os custos e parâmetros utilizados para a recuperação do minério sulfetado, no período pré-pandemia.

Tabela 11 – Custos e parâmetros de recuperação para sulfetados.

Processing sulfide		
	leach	Unit
ORE Cost	3.0000	\$/tonne
AU Cost	0.0000	\$/g
CU Cost	190	\$/tonne
AU Recovery	0.0000	fraction
CU Recovery	0.6500	fraction
AU Economic COG	-	g/tonne
CU Economic COG	0.0845%	Percent

O processamento de minérios sulfetados apresenta um custo de US\$ 3,00 dólares por tonelada para o método de lixiviação (*Leach*). O custo do cobre (CU) associado a esse processo é de US\$ 190 dólares por tonelada. No que diz respeito à recuperação dos metais, não há recuperação de ouro (AU) nesse cenário, enquanto a recuperação de cobre atinge 65%. O corte econômico (COG) para o cobre é de 0,0845%, representando o teor mínimo necessário para que o material seja economicamente viável para processamento. Esses dados evidenciam um custo relativamente baixo para o tratamento de sulfetados,

embora as limitações na recuperação do ouro representem um desafio operacional e econômico.

As Figuras 16 e 17, mostram como ficou o modelo econômico após a execução do modelo no *software*:

Figura 16 - Modelo econômico em corte. A legenda identifica o material enviado para a pilha de estéril (azul), lixiviação (verde) e moagem (vermelho).

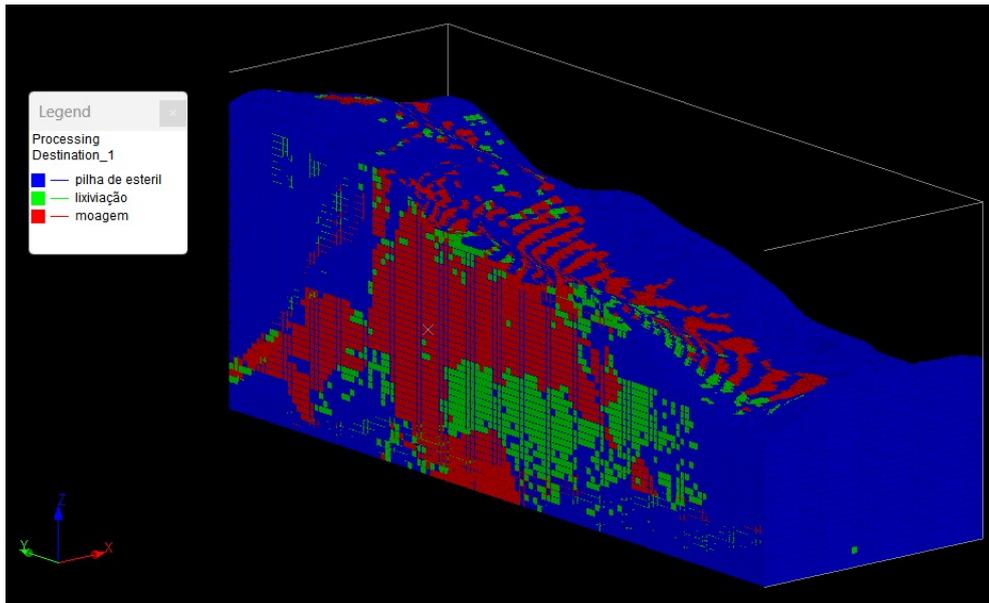
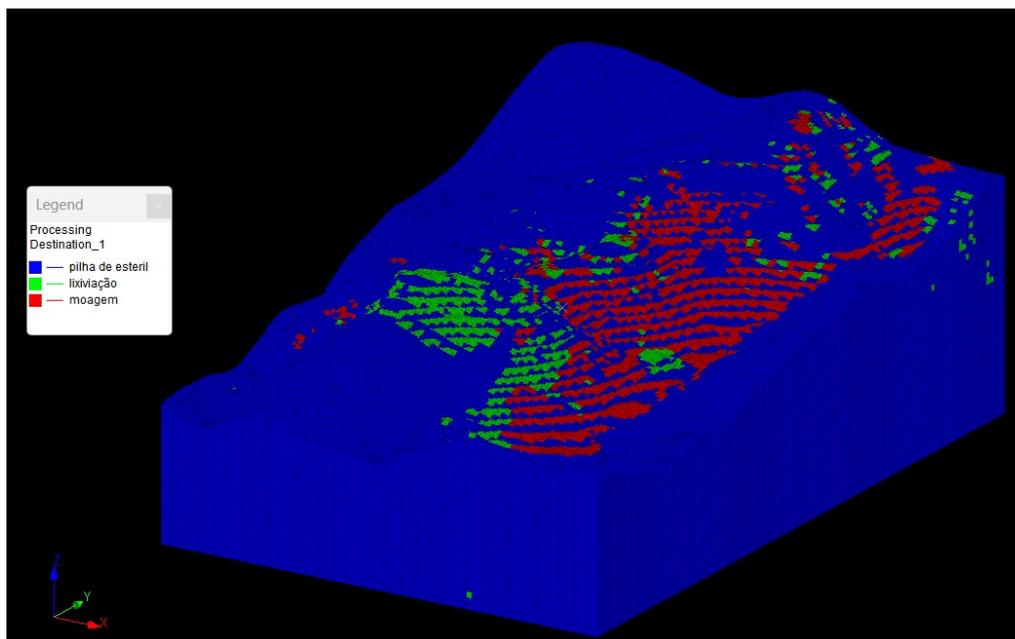


Figura 17 - Modelo econômico em vista completa. A mesma legenda é utilizada para identificação dos destinos do material.



4.1.4 Inputs da Cava Final

Os parâmetros de entrada utilizados na otimização da cava final foram configurados no *software* NPVS da Datamine e são apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14:

Tabela 12 – Parâmetros do VPL (Valor Presente Líquido).

NPV Parameters		Unit
Discount Rate	10.0%	
ORE Output	3,000,000	tonnes per year

O VPL é fundamental para a análise da viabilidade econômica do empreendimento. A taxa mínima de atratividade adotada foi de 10%, sendo essa responsável por atualizar os fluxos de caixa futuros à sua equivalência no presente, refletindo o custo de oportunidade do capital. Taxas mais elevadas reduzem o peso dos ganhos projetados para os anos posteriores, tornando o projeto menos atrativo em longo prazo. Além disso, foi considerada uma produção anual de minério de 3.000.000 de toneladas, valor que influencia diretamente tanto a geração de receita quanto os custos operacionais estimados durante a vida útil do projeto.

Tabela 13 - Opções de Sequenciamento.

Sequence Options			
Optimize NPV	For Phases		
Increment price by	1.0%	Up to	100.0%
OES search based on	Proximity Values		

As opções de sequenciamento aplicadas ao modelo foram configuradas para otimizar o VPL por meio da divisão do plano de lavra em fases. A otimização foi realizada por fases, com o objetivo de maximizar a geração de valor presente em cada etapa do processo de extração. Um incremento de preço de 1,0% foi aplicado progressivamente em simulações, até atingir um limite de 100%,

permitindo a avaliação de diferentes cenários econômicos de acordo com possíveis flutuações nos preços dos metais. A busca OES (*Optimal Extraction Sequence*) foi baseada em valores de proximidade, indicando que os critérios de sequenciamento consideraram a localização espacial e econômica dos blocos dentro do modelo geológico.

Tabela 14 - Parâmetros de Inclinação.

Slopes									
Global	Region Code	Inter Region Slope Check	Slope	8 by	At	0	Slope	45	
Region	0	Parameter 3	Filter	8	azimuth		angle		

Os parâmetros de inclinação configurados para o modelo de cava determinam critérios essenciais de estabilidade e segurança estrutural das paredes. A configuração foi aplicada a uma região global, identificada pelo Código 0, indicando que as definições são válidas para todo o domínio do modelo. O parâmetro de verificação de inclinação entre regiões (*Inter Region Slope Check Parameter*) foi definido como nível 3, o que assegura a compatibilidade dos ângulos de inclinação entre regiões adjacentes, minimizando descontinuidades críticas. O filtro de inclinação, estabelecido como 8 por 8, define a granularidade da malha utilizada para aplicar as inclinações planejadas. A orientação azimutal foi configurada em 0°, representando uma direção padrão, e o ângulo de inclinação das paredes foi definido como 45°, valor amplamente utilizado para garantir condições seguras de estabilidade geotécnica em projetos de lavra a céu aberto.

4.1.5 Resultados da Cava Final

Os resultados da otimização da cava final, considerando as condições pré-pandemia, estão descritos nas Tabelas de 15 a 19. Eles incluem métricas como número de fases, receita líquida, relação estéril/minério e toneladas processadas. A Figura 18 mostra o gráfico "*Pit and Phases*" gerado pelo *software*, após a execução do programa.

Figura 18 - Gráfico “Pit and Phases” – Pushbacks Pré-Pandemia



A Figura 18 representa a avaliação sequencial dos diferentes cenários possíveis de cava final por meio de simulações acumulativas de minério total, estéril total e o VPL. A Figura 18 ilustra a evolução do VPL em função das cavas finais analisadas, possibilitando identificar o ponto ótimo de retorno financeiro considerando o equilíbrio entre volume lavrado e custo operacional.

O cenário selecionado como cava final corresponde à Fase 69, com os seguintes resultados acumulados: 50.566.252 toneladas de minério, 10.195.540 toneladas de estéril e um VPL de US\$ 252.219.285. A escolha dessa fase se justifica por apresentar uma excelente relação estéril/minério, o que reduz significativamente os custos de lavra e processamento. Além disso, o cenário 69 apresenta o ponto de pico absoluto de NPV, garantindo a atratividade econômica do projeto com maior segurança operacional.

Embora o VPL atinja o seu valor absoluto máximo na fase 62, essa alternativa foi descartada por apresentar uma relação estéril/minério menos favorável e maior complexidade operacional. Ou seja, mesmo com uma pequena diferença positiva no NPV, os custos adicionais associados à movimentação de estéril ou à geometria da cava poderiam comprometer a exequibilidade prática do plano. Assim, a Fase 69 foi escolhida por representar um ponto de inflexão vantajoso, em que o ganho econômico é otimizado sem prejudicar a estabilidade e o controle operacional da lavra.

A Tabela 15 apresenta as estatísticas globais do projeto.

Tabela 15 - Estatísticas Globais.

Global Stats						
Cash	Revenue	Process Cost	Mining Cost	Net Value	NPV	Ore Value
	1,613,611,393	354,613,572	841,246,146	417,751,675	251,219,098	574,557,984
	Block Count	Mass	Volume			
ORE	22,396	56,732,475	22,120,420			
Waste	8,830	13,412,330	6,448,831			
Total	31,226	70,144,805	28,569,252			

As estatísticas globais do projeto revelam um panorama financeiro robusto. A receita total alcançou US\$ 1.613.611.393, refletindo o valor bruto gerado pela produção de minério. O custo de processamento foi de US\$ 354.613.572, correspondente às despesas com beneficiamento. Já o custo de mineração, um dos componentes mais significativos, somou US\$ 841.246.146. Após deduzidos esses custos, obteve-se um Valor Líquido de US\$ 417.751.675, indicando viabilidade econômica do empreendimento.

Além disso, o VPL foi de US\$ 251.219.098, evidenciando a atratividade financeira da operação ao longo do tempo e considerando a taxa de desconto aplicada. O valor do minério, por sua vez, foi de US\$ 574.557.984, demonstrando a expressiva contribuição do minério para a formação da receita total. Esses dados reforçam o potencial econômico positivo do projeto, mesmo diante de desafios operacionais e de custos.

A Relação Estéril/Minério (*Strip Ratio*) obtida foi de 0,2364, o que significa que, para cada tonelada de minério extraída, é necessário remover menos de 0,24 toneladas de estéril. Esse resultado representa um excelente indicativo para a operação, pois sugere uma menor movimentação de material estéril em comparação ao minério aproveitável, o que contribui significativamente para a redução dos custos operacionais de lavra e aumento da eficiência econômica do projeto. A Tabela 16 mostra as estatísticas gerais dos minérios de ouro e cobre extraídos da mina.

Tabela 16 - Estatísticas de Minério.

Propriedade	Oxide-Mill	Oxide-Leach	Sulfide-Leach	Total
Mass (tonnes)	48,782,988	3,325,879	4,623,607	56,732,475
Volume (cu.m)	18,945,105	1,321,551	1,853,765	22,120,420
AU (g)	29,738,102	218,322	3,135,416	33,091,841
AU Min (g/tonne)	0.0053	0.0022	0.0022	-
AU Max (g/tonne)	5.5449	0.1526	3.9279	-
CU (tonnes)	117,140	4,285	8,794	130,219
CU Min (%)	0.0215	0.0719	0.0845	-
CU Max (%)	3.0235	0.2374	1.4736	-
AU R (g)	23,076,767	0	0	23,076,767
AU R Min (g/tonne)	0.0041	0	0	-
AU R Max (g/tonne)	4.3028	0	0	-
CU R (tonnes)	93,826	2,702	5,545	102,072
CU R Min (%)	0.0020	0.0454	0.0533	-
CU R Max (%)	2.5809	0.1497	0.9291	-

As estatísticas de minério indicam uma distribuição total de 56.732.475 toneladas, ocupando um volume de 22.120.420 m³. O material oxidado destinado à moagem (oxide-mill) representa a maior parte da massa, com 48.782.988 toneladas e 18.945.105 m³. Já os minérios oxidados submetidos à lixiviação somam 3.325.879 toneladas, enquanto os sulfetados, também lixiviados, totalizam 4.623.607 toneladas. No que diz respeito aos teores de ouro (Au), o valor mínimo registrado foi de 0,0022 g/ton e o máximo, 5,5449 g/ton, evidenciando uma ampla variação na concentração do elemento. Quanto ao cobre (Cu), o teor mínimo observado foi de 0,0215% e o máximo, 3,0235%. Em termos de recuperação metálica, foram recuperados 23.076.767 gramas de ouro e 102.072 toneladas de cobre, destacando a relevância econômica dos volumes extraídos e processados ao longo do projeto. A Tabela 17 apresenta as estatísticas gerais do estéril do projeto.

Tabela 17 - Estatísticas de Estéril.

Waste Stats		
oxide (w)	475,959	187,904
sulfide (w)	5,656,982	2,216,822
waste	7,279,389	4,044,105
Total	13,412,330	6,448,831

As estatísticas de estéril evidenciam a presença de dois tipos principais de materiais: o estéril oxidado e o estéril sulfetado. O estéril oxidado totaliza 475.959 toneladas, com um volume correspondente de 187.904 m³. Já o estéril sulfetado apresenta massa de 5.656.982 toneladas e volume de 2.216.822 m³. Somando-se os diferentes tipos de estéril, tem-se um total de 7.279.389 toneladas e 4.044.105 m³. Esses valores são importantes para avaliar o impacto do material improdutivo no projeto de lavra, especialmente no dimensionamento das pilhas de estocagem e no custo operacional associado à movimentação de material estéril. A Tabela 18 apresenta as informações gerais das cavas geradas.

Tabela 18 - Informações Gerais da Cava Final.

Final Pit		
Type	Lifetime	Shells generated
LG Max Cash	18.91	74

As informações gerais da cava final referem-se ao modelo resultante da aplicação do algoritmo de Lerchs-Grossmann, que foi utilizado com o objetivo de maximizar o fluxo de caixa (*LG Max Cash*). A vida útil estimada da cava é de 18,91 anos, representando o tempo previsto para a completa lavra do depósito considerando as premissas econômicas e técnicas estabelecidas. Durante o processo de otimização, foram geradas 74 cavas finais (*shells*), as quais representam diferentes cenários intermediários de cava que auxiliam na definição do *pit final* economicamente mais viável. Esses dados são fundamentais para o planejamento de longo prazo e para a definição da estratégia de lavra.

4.1.6 Imagens da Cava Final

As Figuras 19 e 20 representam a cava final gerada com base no modelo econômico. A primeira imagem mostra a cava em vista lateral, enquanto a segunda apresenta uma vista superior. Ambas as imagens fornecem informações essenciais sobre o planejamento geométrico da cava.

Figura 19 - Vista lateral da cava final – Pré-Pandemia.

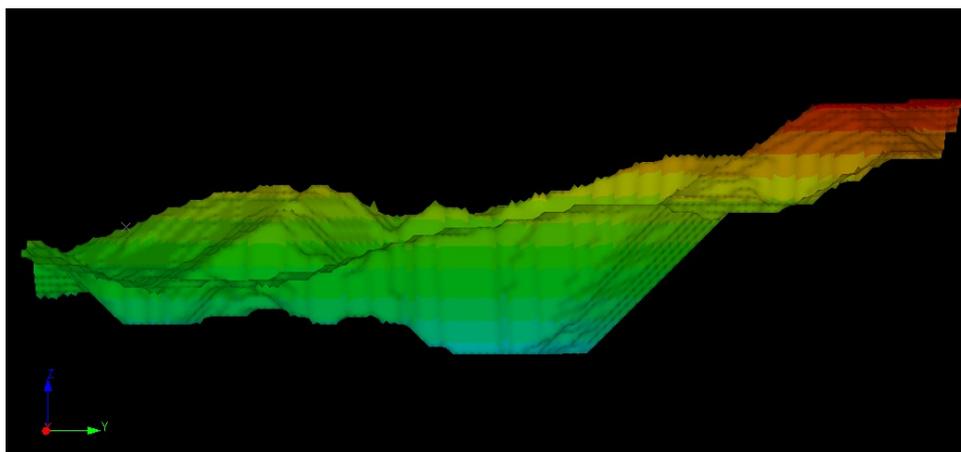
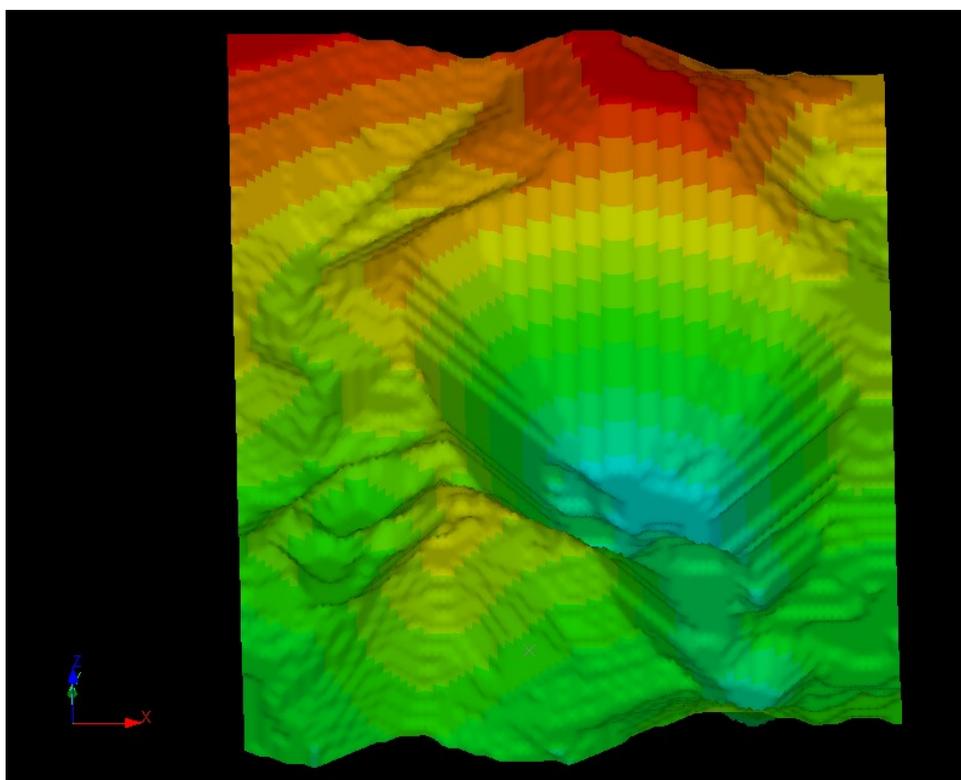


Figura 20 - Vista superior da cava final – Pré-Pandemia



4.2 Pós-Pandemia

Para o cenário Pós Pandemia foram utilizados a mesma topografia inicial e o mesmo modelo de blocos utilizados para o cenário Pré Pandemia com o objetivo de fazer uma comparação entre os dois casos em um mesmo ambiente.

4.2.1. Inputs Modelo Econômico

As Tabelas 19 a 23 apresentam os parâmetros fundamentais utilizados na construção do modelo econômico do cenário pós-pandemia, abrangendo preços de mercado, custos de mineração, ajustes operacionais e dados de processamento para minérios oxidado e sulfetado.

Tabela 19 - Preços utilizados de ouro e cobre pós-pandemia.

Prices		
	Price	Selling Cost
AU	59.28	0.0000
CU	8,480	0.0000

Os preços adotados para ouro (Au) e cobre (Cu) no cenário pós-pandemia refletem o comportamento médio de mercado no período analisado. O preço do ouro foi estabelecido em US\$ 59,28 por grama, enquanto o cobre foi avaliado em US\$ 8.480,00 por tonelada. Ambos os metais não apresentaram custos de venda (*selling cost*), sendo considerados nulos para fins de cálculo. Esses valores foram obtidos a partir da média dos cinco anos utilizados como base para o modelo pós-pandêmico, assegurando consistência na simulação econômica.

Tabela 20 - *Mining Reference* - Pós-pandemia.

Mining Reference		
Cost	Dilution	Recovery
\$/tonne		
24.61	10.0%	97.0%

Os custos de mineração apresentaram um salto expressivo em comparação com o período pré-pandêmico, atingindo US\$ 24,61 por tonelada. Esse aumento reflete uma série de mudanças e desafios que o setor enfrentou nos últimos anos. A pandemia da COVID-19 trouxe impactos significativos, desestruturando cadeias de suprimentos no mundo todo e elevando os preços de combustíveis, insumos e equipamentos essenciais para a operação das minas. Além disso, houve escassez de mão de obra especializada, maior demanda por medidas sanitárias e adaptações operacionais que exigiram novos investimentos. Tudo isso, somado, tornou a atividade de lavra mais cara e complexa, o que ajuda a compreender a variação observada nos custos entre os dois períodos analisados.

A diluição foi fixada em 10,00%, o que implica que uma fração não mineralizada do material extraído compromete parte do potencial de retorno. A taxa de recuperação manteve-se alta, em 97,00%, demonstrando a eficiência no processo de separação dos elementos de interesse.

Tabela 21 - Ajustes de Bancada - Pós-pandemia.

Bench Adjustments	Default	mill	leach	Unit
Reference Bench	8	8	8	-
Adjust Above	0.0100	0.0100	0.0100	\$/bench
Adjust Below	0.0150	0.0150	0.0150	\$/bench

O modelo considerou uma bancada de referência de 8 metros, tanto para os modos "*default*", "*mill*" e "*leach*". Os ajustes operacionais por bancada indicam acréscimos nos custos operacionais dependendo da localização vertical do material: US\$ 0,0100 por metro acima da referência e US\$ 0,0150 por metro

abaixo. Esses valores impactam diretamente a estrutura de custos de lavra conforme a profundidade de extração.

Tabela 22 - Custos e Parâmetros de Processamento de Oxidados - Pós-pandemia.

Processing oxide			
	mill	leach	Unit
ORE Cost	6.0000	2.5500	\$/tonne
AU Cost	0.0000	0.0000	\$/g
CU Cost	180	190	\$/tonne
AU Recovery	0.8000	0.0000	fraction
CU Recovery	Formula 1	0.6500	fraction
AU Economic COG	0.1242	infinite	g/tonne
CU Economic COG	0.1327%	0.0507%	Percent

Para minérios oxidados, o custo de processamento foi de US\$ 6,00 por tonelada na moagem e US\$ 2,55 por tonelada na lixiviação. O custo do cobre variou entre US\$ 180 (*mill*) e US\$ 190 (*leach*) por tonelada. A taxa de recuperação de ouro foi de 80,00% para moagem, enquanto na lixiviação não houve recuperação. Para o cobre, foi utilizada uma fórmula no modo "*mill*" e uma taxa de 65,00% no modo "*leach*". O teor de corte econômico para o ouro no modo moagem foi de 0,1242 g/t, e para o cobre de 0,1327% (*mill*) e 0,0507% (*leach*), valores que definem os limites de viabilidade econômica para o processamento do material.

Tabela 23 - Custos e Parâmetros de Processamento de Sulfetados - Pós-pandemia.

Processing sulfide		
	leach	Unit
ORE Cost	3.0000	\$/tonne
AU Cost	0.0000	\$/g
CU Cost	190	\$/tonne
AU Recovery	0.0000	fraction
CU Recovery	0.6500	fraction
AU Economic COG	infinite	g/tonne
CU Economic COG	0.0597%	Percent

Os minérios sulfetados foram considerados apenas no modo de lixiviação, com custo de US\$ 3,00 por tonelada. A recuperação de ouro foi nula, enquanto o cobre teve recuperação de 65,00%. O teor de corte econômico aplicado para o cobre foi de 0,0597%. Esses dados demonstram que, embora o processamento de sulfetos seja relativamente mais barato, a ausência de recuperação de ouro e a dependência do teor de cobre tornam esse tipo de minério mais sensível às variações de mercado.

O preço do ouro aumentou significativamente, refletindo uma valorização impulsionada pela alta demanda durante e após a pandemia, geralmente associada à sua função como ativo de reserva em períodos de crise. O preço do cobre também aumentou substancialmente, indicando maior demanda industrial, especialmente com a retomada das economias e o foco em tecnologias verdes (ex.: veículos elétricos e energias renováveis).

O custo de mineração mais que dobrou, refletindo os impactos da inflação global, interrupções na cadeia de suprimentos e aumento dos custos de energia e mão de obra. A consistência da diluição indica estabilidade no controle operacional, apesar das pressões econômicas. A eficiência na recuperação permanece estável, indicando que os processos técnicos não foram significativamente impactados.

Os teores de corte reduziram, indicando maior atratividade econômica para materiais de menor teor devido ao aumento dos preços dos metais.

Após os dados imputados no modelo econômico e a execução do *software*, gerou-se as Figuras 21 e 22, que representam o modelo em vistas diferentes:

Figura 21 - Modelo Econômico Pós Pandemia.

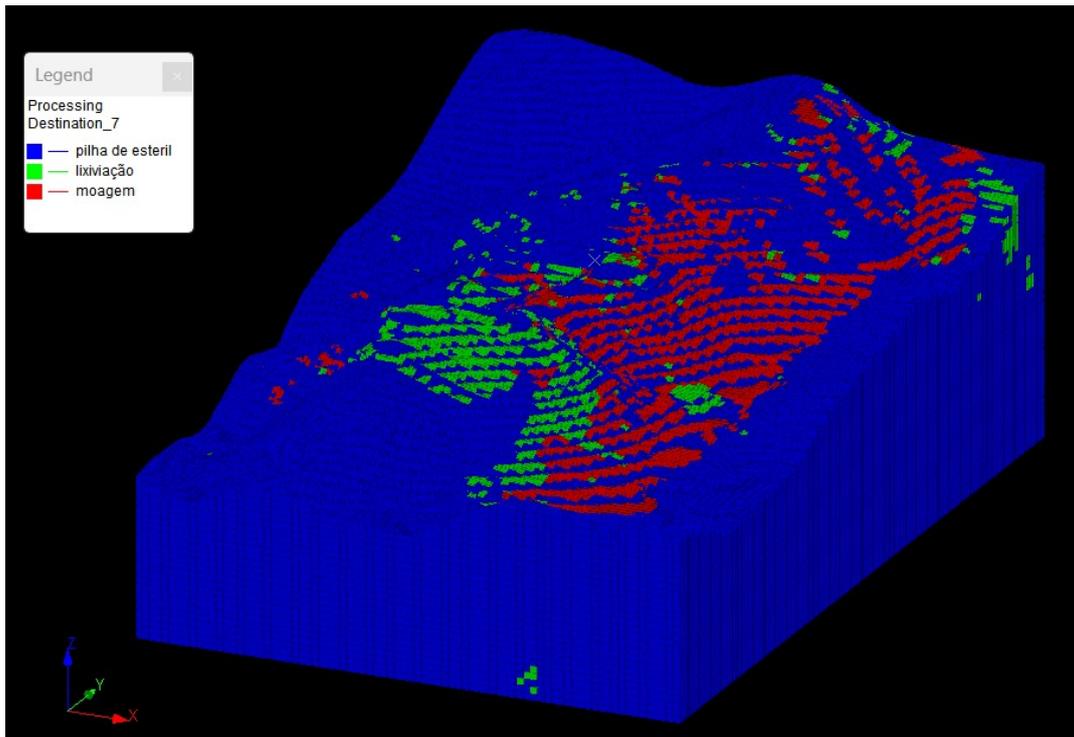
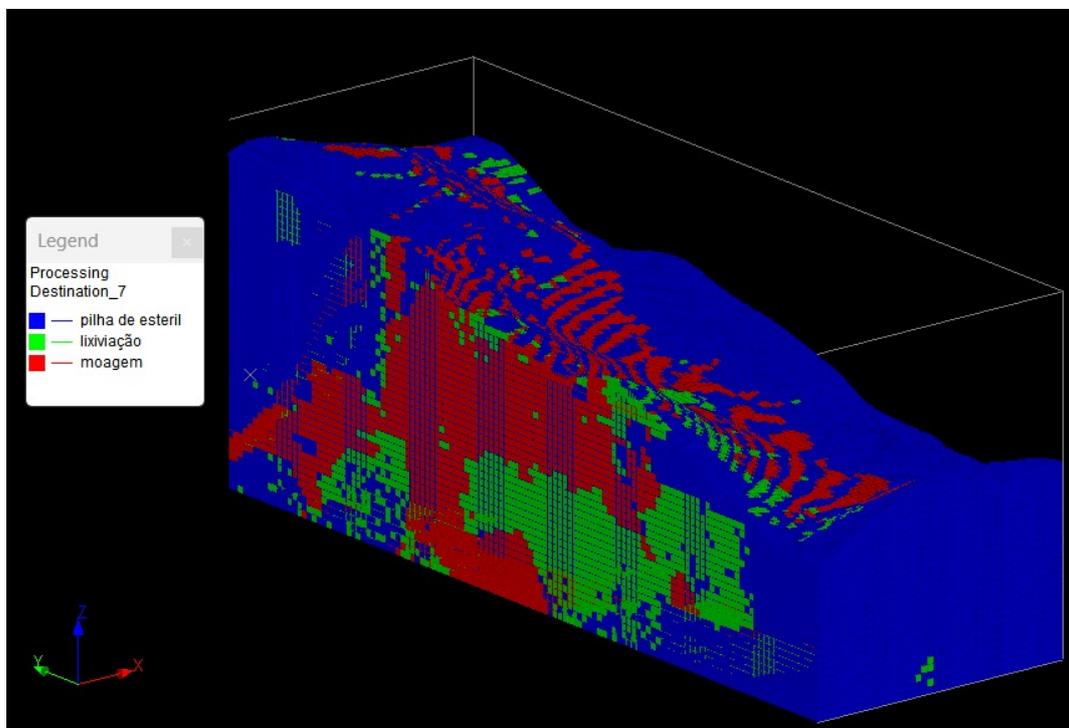


Figura 22 - Modelo Econômico Pós Pandemia – Vista em Corte.



Nota-se uma distribuição significativa de material destinado à moagem e à lixiviação, indicando que, apesar das mudanças econômicas e operacionais

impostas pela pandemia, o modelo ainda apresenta viabilidade para extração de um volume considerável de minério. O volume destinado ao estéril permanece relevante, refletindo a necessidade de equilíbrio entre custo de operação e recuperação econômica.

Em comparação com o modelo pré-pandemia, há uma maior proporção de blocos destinados ao estéril, reflexo do aumento nos custos de operação, como energia, insumos e impacto da inflação. A redução no volume de material destinado à moagem e lixiviação reflete a maior seletividade do modelo pós-pandemia para viabilizar economicamente a operação.

Enquanto o modelo pré-pandemia apresentava uma maior distribuição de blocos economicamente viáveis (moagem e lixiviação) em camadas intermediárias, o modelo pós-pandemia concentra esses blocos em regiões mais profundas. Isso pode ser resultado de um reajuste nos parâmetros econômicos, como preço do minério e custos de operação, que impactaram a viabilidade de camadas anteriormente consideradas lucrativas.

O modelo pós-pandemia destaca uma estratégia de maior foco em eficiência econômica, descartando blocos que antes poderiam ser marginalmente lucrativos. Essa mudança reflete a necessidade de adaptação às condições econômicas mais restritivas.

4.2.2 Inputs Cava Final

As Tabelas 24 e 25 apresentam os parâmetros fundamentais utilizados para a definição da cava final no cenário pós-pandemia, considerando aspectos econômicos, estratégicos e geotécnicos essenciais para a modelagem.

Tabela 24 - Parâmetros de VPL - Pós-pandemia.

NPV Parameters		
Discount Rate	10.0000%	
ORE Output	3,000,000	tonnes per year

A taxa mínima de atratividade adotada foi de 10%, valor amplamente utilizado em estudos de viabilidade econômica no setor mineral. Essa taxa permite atualizar os fluxos de caixa futuros para valores presentes, refletindo riscos associados ao investimento e ao tempo. A produção de minério foi estimada em 3.000.000 toneladas por ano, valor que influencia diretamente a vida útil projetada da cava e a capacidade de geração de caixa ao longo do tempo. Esse volume anual sugere um planejamento estratégico pautado em metas de extração sustentáveis e alinhadas à capacidade operacional do empreendimento.

Tabela 25 - Opções de Sequenciamento - Pós-pandemia.

Sequence Options			
Optimize NPV	For Phases		
Increment price by	1.0000%	Up to	100.0000%
OES search based on	Proximity Values		

O sequenciamento do modelo pós-pandemia foi otimizado com base em fases (*For Phases*), o que permite uma abordagem modular e gradual na lavra, maximizando o NPV em cada etapa de avanço da cava. O preço de mercado dos produtos foi simulado com incrementos de 1% por iteração, até o limite de 100%, o que permitiu uma análise de sensibilidade detalhada em diferentes cenários econômicos. Para guiar essa otimização, a busca foi baseada em valores de proximidade (*Proximity Values*), priorizando blocos de minério com maior viabilidade econômica e logística, considerando sua posição relativa dentro do modelo geológico e operacional.

A geometria da cava foi configurada com parâmetros globais aplicáveis a toda a estrutura do modelo, utilizando o código de região 0. A checagem de inclinação inter-regional foi definida com o parâmetro 3, garantindo consistência nas transições entre blocos adjacentes. O filtro de inclinação foi estabelecido em uma malha 8 por 8, com orientação no azimute zero (0°), assegurando simetria e controle direcional no modelo. O ângulo de inclinação adotado foi de 45°, valor que atende aos critérios de estabilidade geotécnica e viabilidade operacional da

cava final, proporcionando segurança estrutural sem comprometer a recuperação econômica.

4.2.3 Resultados da Cava Final

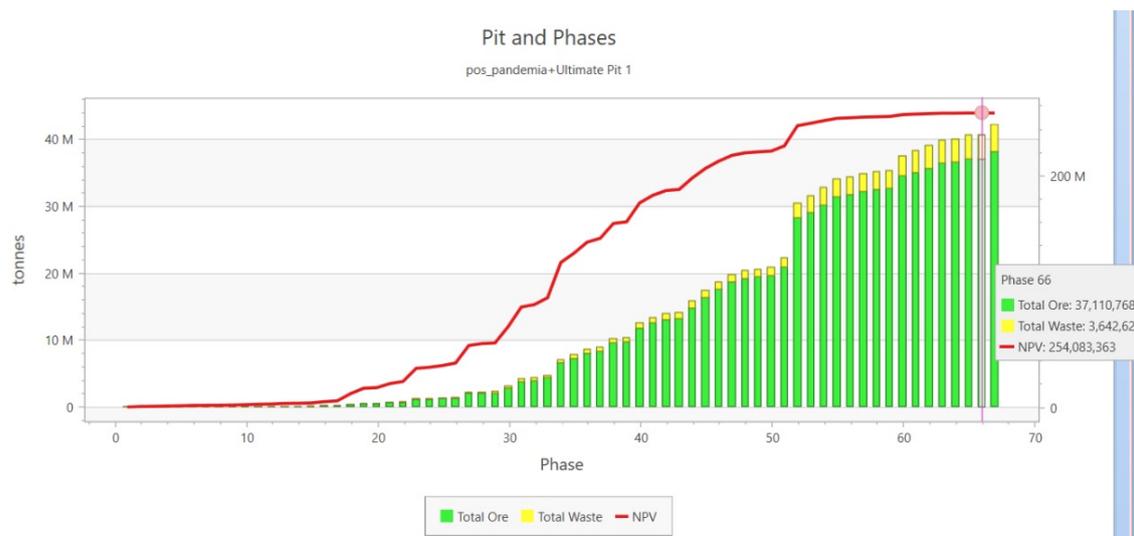
Após a inserção dos parâmetros finais no modelo econômico pós-pandemia, foi necessária a re-execução do *software* para a geração da cava final. O resultado desse processamento é apresentado na Tabela 26, que resume as principais informações da cava otimizada.

Tabela 26 - Informações da Cava Final.

Final Pit			
	Type	Lifetime	Shells generated
	LG Max Cash	13.21	68

O tipo de cava gerada foi a *LG Max Cash*, metodologia baseada no algoritmo de Lerchs-Grossmann, cujo objetivo é maximizar o valor econômico do projeto por meio da seleção ótima de blocos a serem lavrados. A vida útil estimada da cava foi de 13,21 anos, representando o tempo projetado de operação para a extração do minério economicamente viável dentro das condições impostas. Além disso, foram geradas 68 cavas, indicando os diferentes cenários de lavra incremental considerados na construção do modelo final. Esses resultados demonstram uma modelagem compacta e eficiente, ajustada às condições econômicas pós-pandemia. A Figura 23, apresenta o gráfico “*Pit and Phases*” do período pós-pandemia.

Figura 23 - Gráfico “Pit and Phases” – Pós Pandemia.



A Figura 23 apresenta o gráfico de “Pit and Phases” referente ao modelo econômico pós-pandemia, representando a evolução cumulativa do minério total (*Total Ore*), estéril total (*Total Waste*) e do VPL ao longo das diferentes fases de lavra.

Dentre os diversos cenários analisados, foi selecionada a Fase 66 para composição da cava final. Essa escolha foi motivada por representar um ponto de equilíbrio ótimo entre a maximização do retorno financeiro e o controle operacional do projeto. Especificamente, a Fase 66 apresenta um VPL de aproximadamente US\$ 254 milhões de dólares, valor que, apresenta o pico absoluto da curva, patamar mais alto de estabilização, evidenciando um excelente desempenho econômico com riscos reduzidos de perdas associadas à volatilidade de mercado.

Adicionalmente, essa fase apresenta uma quantidade de estéril relativamente moderada de 3.642.624 toneladas, o que reduz significativamente os custos relacionados à movimentação de material sem valor econômico. Por fim, o volume de minério extraído de 37.110.768 toneladas é suficientemente elevado para justificar a continuidade operacional do projeto, assegurando uma boa taxa de retorno e uma relação estéril/minério favorável.

A escolha não recaiu sobre a Fase 51, ainda que essa apresente o pico máximo de VPL, porque esse ponto tende a apresentar maior sensibilidade a variações operacionais e econômicas. Pequenas alterações nos parâmetros ou

no sequenciamento poderiam resultar em uma redução drástica do VPL. Além disso, a Fase 66 se mostrou mais robusta no balanceamento entre massa total movimentada, estabilidade do fluxo de caixa e menores riscos associados à remoção excessiva de estéril, justificando sua adoção como cenário final do projeto.

A Tabela 27 apresenta as estatísticas globais obtidas após a simulação do modelo econômico pós-pandemia. Esses dados sintetizam os principais indicadores financeiros e operacionais resultantes do processamento do cenário final escolhido, permitindo uma visão integrada do desempenho econômico do projeto de mineração.

Tabela 27 - Estatísticas Globais - Pós-pandemia.

Global Stats						
Cash	Revenue	Process Cost	Mining Cost	Net Value	NPV	Ore Value
	1,733,884,208	251,195,203	1,122,392,559	360,296,446	250,359,541	477,779,685
	Block Count	Mass	Volume			
ORE	15,688	39,627,583	15,453,377			
Waste	3,863	4,360,196	2,160,884			
Total	19,551	43,987,779	17,614,261			

De acordo com a Tabela 27, a receita total gerada pelo projeto é de US\$ 1.733.884.208, valor que representa o retorno bruto estimado a partir da comercialização dos produtos minerais. O custo total de processamento é de US\$ 251.195.203, enquanto o custo de mineração alcança US\$ 1.122.392.559, sendo este último o componente mais significativo entre os gastos operacionais. O valor líquido obtido (*Net Value*) é de US\$ 360.296.446, demonstrando a viabilidade econômica da operação mesmo diante de altos custos. O VPL calculado para o projeto pós-pandemia foi de US\$ 250.359.541, um indicador que reforça a atratividade do investimento ao longo do tempo.

Além disso, o valor atribuído ao minério (*Ore Value*) foi de US\$ 477.779.685, expressando sua contribuição direta à geração de receita. Em

termos de blocos operacionais, a cava conta com 19.551 blocos, sendo 15.688 de minério e 3.863 de estéril. A massa total movimentada é de 43.987.779 toneladas, enquanto o volume corresponde a 17.614.261 metros cúbicos, consolidando as dimensões físicas do projeto no cenário pós-pandemia. A

REM do projeto pós-pandemia obtida foi de 0.1100

A Tabela 28 apresenta as estatísticas detalhadas do minério no cenário pós-pandemia, distribuídas por tipos de material (*Oxide-Mill*, *Oxide-Leach* e *Sulfide-Leach*). Essa tabela é fundamental para compreender a composição mineral do depósito, a distribuição de teores metálicos e a eficiência da recuperação de ouro (Au) e cobre (Cu).

Tabela 28 - Estatísticas do Minério - Pós-pandemia.

Atributo	Oxide-Mill	Oxide-Leach	Sulfide-Leach	Total
Mass (tonnes)	34,977,630	1,318,082	3,331,872	39,627,583
Volume (cu.m)	13,591,684	526,929	1,334,764	15,453,377
AU (g)	21,478,625	61,200	1,994,910	23,534,736
AU Min (g/tonne)	0.0053	0.0022	0.0022	-
AU Max (g/tonne)	5.5449	0.1090	3.9400	-
CU (tonnes)	84,565	1,597	4,890	91,053
CU Min (%)	0.0326	0.0529	0.0597	-
CU Max (%)	3.0235	0.1917	1.4053	-
AU R (g)	16,667,413	0	0	16,667,413
AU R Min (g/tonne)	0.0041	0.0000	0.0000	-
AU R Max (g/tonne)	4.3028	0.0000	0.0000	-
CU R (tonnes)	67,998	1,007	3,083	72,088
CU R Min (%)	0.0045	0.0334	0.0377	-
CU R Max (%)	2.5809	0.1208	0.8861	-

De acordo com os dados da Tabela 28, a massa total de minério disponível é de 39.627.583 toneladas, com um volume correspondente de 15.453.377 m³. O conteúdo total de ouro é de 23.534.736 gramas, enquanto o cobre totaliza 91.053 toneladas. A distribuição por tipo de minério revela que o *Oxide-Mill* representa a maior parte, com 34.977.630 toneladas, 13.591.684 m³ de volume, 21.478.625 g de Au e 84.565 t de Cu. Já o *Oxide-Leach* contabiliza 1.318.082 toneladas, 526.929 m³, 61.200 g de Au e 1.597 t de Cu. Por fim, o *Sulfide-Leach* apresenta 3.331.872 toneladas, 1.334.764 m³, 1.994.910 g de Au e 4.890 t de Cu.

Esses dados reforçam a importância da separação mineralógica no planejamento de lavra, evidenciando que a maior concentração de metal está nos óxidos moídos (*Oxide-Mill*), enquanto os materiais lixiviáveis contribuem com menores volumes e teores.

A Tabela 29 apresenta as estatísticas do estéril para o cenário pós-pandemia, sendo um elemento essencial na avaliação da relação estéril/minério (REM) e na estimativa de volumes a serem movimentados sem valor econômico direto.

Tabela 29 - Estatísticas do Estéril - Pós-pandemia.

Waste Stats		
oxide (w)	22,860	9,000
sulfide (w)	1,563,352	610,782
waste	2,773,984	1,541,102
Total	4,360,196	2,160,884

Com base nos dados, observa-se que o total de estéril no modelo pós-pandemia é de 4.360.196 toneladas, distribuídas em um volume de 2.160.884 m³. Quando segregado por tipo, o estéril oxidado (*oxide*) representa 22.860 toneladas, com um volume de 9.000 m³. Já o estéril associado ao sulfetado (*sulfide*) é significativamente maior, com 1.563.352 toneladas e volume correspondente de 610.782 m³. A maior parcela, no entanto, está classificada como “*waste*” genérico, com 2.773.984 toneladas e 1.541.102 m³ de volume.

4.2.4. Imagens da Cava Final Pós-Pandemia

As Figuras 24 e 25 apresentam as imagens da cava final geradas pelo *software*, com duas diferentes vistas, superior e lateral, do período pós-pandemia.

Figura 24 - Vista Superior da Cava Final Pós-Pandemia.

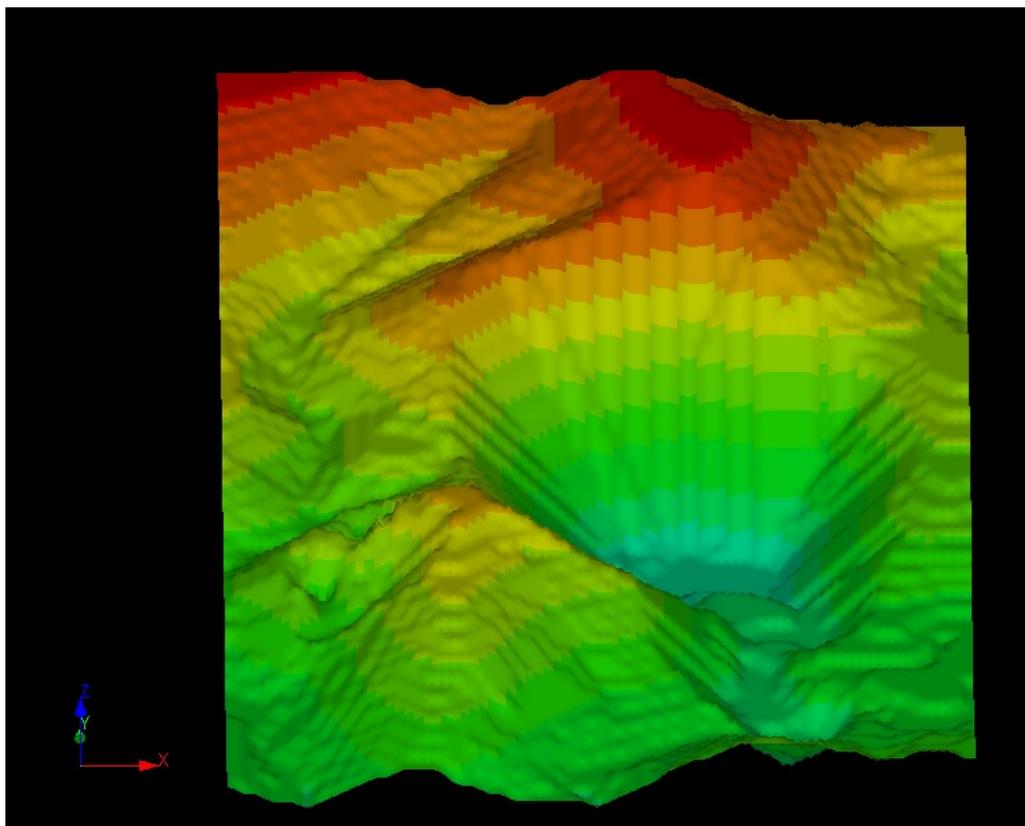
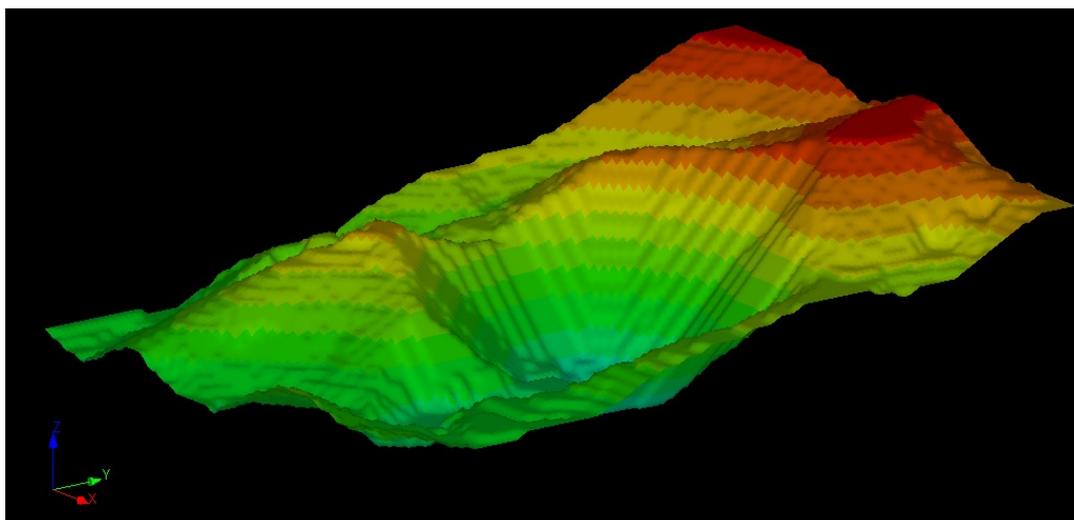


Figura 25 - Vista Lateral da Cava Final Pós Pandemia.



4.3 Comparação da Cava Final Pré e Pós-Pandemia

São apresentados os principais pontos de comparação entre os cenários de cava final modelados para os períodos pré e pós-pandemia, considerando aspectos técnicos, operacionais e econômicos.

- **Lifetime e cavas finais geradas:**
 - Pré-pandemia: *Lifetime* de 18.91 anos com 74 cavas finais.
 - Pós-pandemia: *Lifetime* reduzido para 13.21 anos com 68 cavas finais.

A redução no tempo de vida útil da cava final no cenário pós-pandemia reflete mudanças estratégicas nos critérios econômicos e operacionais adotados. O menor número de cavas geradas e o tempo de vida mais curto indicam uma abordagem mais conservadora e focada na rentabilidade imediata, possivelmente impulsionada pela instabilidade econômica global após a pandemia. A redução de mais de 5 anos no *lifetime* sugere uma operação mais agressiva, priorizando as fases de lavra mais lucrativas e evitando prolongar o projeto em áreas de menor teor ou maior custo de remoção. Isso se alinha à lógica de proteção financeira em cenários de incerteza econômica.

- **Receita Total:**
 - Pré-pandemia: \$1.613.611.393.
 - Pós-pandemia: \$1.733.884.208.

O aumento na receita bruta no cenário pós-pandemia está diretamente relacionado à valorização dos preços dos metais, especialmente o ouro (Au) e o cobre (Cu), cujos valores de mercado foram impactados positivamente após a crise sanitária global. Isso influenciou diretamente a atratividade econômica de blocos anteriormente considerados exploráveis.

- **VPL (Valor Presente Líquido):**

- Pré-pandemia: \$251.219.098.
- Pós-pandemia: \$250.359.541.

Apesar da elevação na receita, o VPL apresentou leve queda no modelo pós-pandemia. Isso se deve, principalmente, ao aumento dos custos operacionais, como o custo de mineração, e à manutenção de uma taxa mínima de atratividade conservadora de 10%, o que penaliza fluxos de caixa mais distantes no tempo. Isso evidencia que, embora o cenário seja mais lucrativo em valores brutos, a geração de valor ao longo do tempo não se ampliou na mesma proporção.

- **Strip Ratio (Relação Estéril/Minério):**

- Pré-pandemia: 0.2364.
- Pós-pandemia: 0.1100.

A significativa redução na Relação Estéril/Minério REM pós-pandemia representa um avanço em termos de eficiência operacional. Para cada tonelada de minério lavrada, a quantidade de estéril a ser removida caiu pela metade. Isso indica que o planejamento da lavra foi ajustado para evitar remoções excessivas, focando na lavra seletiva de blocos com maior teor e melhor relação custo-benefício. Essa mudança é benéfica para o projeto, reduzindo consumo de combustível, desgaste de equipamentos e tempo de transporte, o que contribui diretamente para a redução do custo por tonelada processada.

- **Estatísticas do Minério (ORE Stats):**

A Tabela 30 mostra as estatísticas de minério nos períodos pré e pós-pandemia.

Tabela 30 - Estatísticas do minério – Pré e Pós-pandemia.

Cenário	Massa (ton)	Au Total (g)	Au Médio (g/t)	Au Máx	Au Mín	Cu Total (t)	Cu Médio (%)	Cu Máx (%)	Cu Mín (%)
Pré-pandemia	56.732.475	33.091.841	0.5832	5.5449	0.0022	130.219	0.15	3.0235	0.0215
Pós-pandemia	39.627.583	23.534.736	0.594	5.5449	0.0022	91.053	0.15	3.0235	0.0326

A análise dos teores médios de ouro e cobre revela uma manutenção da concentração média de Au e Cu entre os dois períodos, mesmo com a significativa redução da massa mineral lavrada no cenário pós-pandemia. Isso indica uma seleção mais precisa e econômica dos blocos, com foco em zonas de maior teor, otimizando a recuperação e o retorno por tonelada lavrada. A escolha estratégica de um minério mais concentrado, mesmo em menor quantidade, favorece a lucratividade do projeto em um cenário de maior pressão por eficiência econômica.

- **Custo de mineração:**
 - Pré-pandemia: \$841.246.146.
 - Pós-pandemia: \$1.122.392.559.

O aumento de mais de 33% no custo de mineração pode ser atribuído a múltiplos fatores, incluindo reajustes nos preços de insumos, inflação nos combustíveis, custos trabalhistas, além de reconfigurações nos parâmetros operacionais, como menor vida útil da cava e maior uso de equipamentos especializados para lavra seletiva. Além disso, a maior eficiência da relação estéril/minério não compensou totalmente os custos operacionais adicionais, o que evidencia uma pressão inflacionária sobre a atividade mineral no período pós-crise.

Geometria

A análise comparativa entre as imagens da cava final pós-pandemia e as da cava final pré-pandemia demonstra diferenças significativas tanto na geometria quanto no volume da cava gerada:

- **Vista Lateral:**

O cenário pós-pandemia apresenta encostas mais inclinadas e uma geometria mais profunda e concentrada, sugerindo uma estratégia de acesso rápido às zonas mais ricas. Já a cava pré-pandemia possui declividades mais suaves, priorizando maior extensão lateral e volume total, com menor profundidade média.

- **Vista Inferior:**

A cava pós-pandemia mostra uma redução significativa da área escavada, com foco em zonas de alta concentração mineral. Isso está alinhado com uma estratégia de lavra seletiva e controle de custos. Em contraste, o modelo pré-pandemia explorava uma área mais ampla, com acesso a maior volume, mas com teores médios semelhantes, o que implica maior volume de estéril e custos adicionais de movimentação.

Os dados pós-pandemia refletem uma operação mais seletiva e eficiente, priorizando maior receita em menor tempo, apesar dos custos mais elevados. Essa abordagem foi possível devido às mudanças nos preços de mercado e critérios econômicos ajustados. Em comparação, os dados pré-pandemia sugeriam um projeto de maior escala e duração, mas com menor eficiência operacional em termos de *strip ratio* e custos proporcionais.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise abrangente sobre os impactos de diferentes cenários econômicos no planejamento de lavra e na configuração da cava final em uma operação de mineração. Foram considerados dois cenários distintos, pré e pós-pandemia, que serviram como base para avaliar as mudanças no planejamento estratégico, nos parâmetros operacionais e nos resultados financeiros. Essa abordagem permitiu compreender como fatores externos, como variações econômicas e mudanças nos preços de mercado, influenciam diretamente as decisões técnicas e econômicas de projetos de mineração.

Os resultados demonstraram que o cenário pós-pandemia levou a uma maior seletividade no planejamento de lavra, evidenciado pela geometria mais compacta da cava final, redução significativa na relação estéril/minério (*strip ratio*) e priorização de blocos com maior teor de minério. Essa mudança reflete uma necessidade de maximizar a eficiência econômica, reduzindo custos operacionais e otimizando o valor presente líquido (NPV) em resposta a um ambiente econômico mais desafiador, caracterizado por flutuações nos preços das *commodities* e pressões financeiras.

Por outro lado, o cenário pré-pandemia apresentou uma abordagem mais ampla e expansiva, com foco na maximização do volume de minério extraído. Essa estratégia era viável em um contexto econômico mais estável, onde a operação em larga escala, mesmo com maiores custos de remoção de estéril, ainda proporcionava retornos atrativos. A menor seletividade desse modelo reflete um ambiente de menor pressão para maximizar margens operacionais e maior flexibilidade econômica.

As variações nos preços das *commodities* e nas condições econômicas influenciam diretamente o planejamento de lavra. O cenário pós-pandemia evidenciou como ajustes nos custos, nas taxas de recuperação e nos preços de venda podem alterar significativamente a configuração da cava, priorizando a lucratividade em vez da escala. Esse modelo também reforçou a importância da maximização do VPL como indicador central de viabilidade econômica,

destacando a necessidade de estratégias adaptativas frente a contextos globais adversos. Além disso, ficou evidente que uma lavra mais seletiva e focada em blocos de maior valor permite otimizar os resultados financeiros com menor movimentação de estéril e maior eficiência operacional.

Implicações para o Setor Mineral

Os resultados obtidos fornecem *insights* valiosos para a indústria de mineração, destacando a importância de estratégias flexíveis e adaptativas no planejamento de lavra. O setor mineral opera em um ambiente de alta volatilidade, onde mudanças nos preços de mercado, nos custos operacionais e nas condições econômicas globais podem impactar significativamente os resultados de um projeto. Assim, o uso de modelos econômicos dinâmicos e a aplicação de ferramentas avançadas de otimização são essenciais para garantir a viabilidade e a sustentabilidade dos empreendimentos de mineração.

Diante dos resultados obtidos, recomenda-se que trabalhos futuros explorem com maior profundidade os impactos ambientais das diferentes estratégias de lavra, incluindo aspectos como eficiência energética. Também é pertinente investigar o uso de técnicas avançadas, como *machine learning*, para prever cenários econômicos e adaptar o planejamento em tempo real. Além disso, a adoção de análises multicritério que incorporem fatores econômicos, sociais e ambientais pode contribuir para um planejamento de lavra mais equilibrado e sustentável.

Em conclusão, este estudo demonstra como a mineração, enquanto atividade econômica essencial, precisa ser conduzida de forma adaptativa e responsiva às condições econômicas globais. O entendimento das diferenças entre os cenários pré e pós-pandemia é uma contribuição significativa para a literatura e para a prática da mineração, permitindo decisões mais embasadas e estratégias mais robustas para enfrentar os desafios futuros do setor mineral.

6. REFERÊNCIAS

- CACCETA, L.; HILL, S. P. (2003). An Application Of Branch And Cut To Open Pit Mine Scheduling. *Journal Of Global Optimization*, v.27, p.349-365.1
- CURI, A. (2014). Minas a Céu Aberto: Planejamento de Lavra. Oficina de Textos.1
- DARLING, P. (2011). *SME Mining Engineering Handbook*. 3. ed. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.1
- GARCIA, J. L. F. (2003). Avaliação Econômica de Projetos de Mineração, Envolvendo Decisões de Investimento, sob Condições de Incerteza. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2003. Tese (Doutorado).2
- HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press. 1308 p.2
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. (2020). A importância da mineração para a vida moderna. Disponível em: <https://ibram.org.br>2
- KPMG. (2020). COVID-19 and the Mining Industry: Resilience and Recovery.2
- NEWMAN, A.; RUBIO, E.; CARO, R.; WEINTRAUB, A.; UREK, K. (2010). A Review Of Operations Research In Mine Planning. *Interfaces*, n.3, v. 40, p. 222-245.3
- PERIOTTO, A. J. (1992). Determinação da Cava Ótima em Mineração a Céu Aberto Através de Programação Paralela. UFRJ, 1992.3
- USGS – United States Geological Survey. (2021). Minerals and Society. Disponível em: <https://www.usgs.gov>4
- WHITTLE, D. (2011). Open-Pit Planning and Design. In: DARLING, P. *SME Mining Engineering Handbook*. 3. ed. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 2011. p. 877-902.4
- AMARAL, M. do. Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto. 2008. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2008.

ARMSTRONG, D. Definition of Mining Parameters. In: KENNEDY, B. A. (Ed.). Surface Mining. 2. ed. Littleton: SME, 1990. p. 459–464.

BAZANTE, A. J. A interação entre o planejamento e controle de qualidade na maximização da função benefício de um empreendimento mineral. 2004. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2004.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. Rock Mechanics for Underground Mining. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2006.

CAMPOS, P. H. A. Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

CAMUS, J. P. Management of Mineral Resources: Creating Value in the Mining Business. Littleton: SME, 2002.

CAMUS, J. P. Strategic and Tactical Planning in Mining. Santiago: University of Chile, 2003.

CANDIDO, M. T. Impacto de diferentes algoritmos e geometria de depósitos minerais no planejamento de longo prazo. 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

CARMO, F. A. R. Metodologias para o planejamento de cavas finais de minas a céu aberto otimizadas. 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2001.

CARMO, F. A. R.; CURI, A.; SOUSA, W. T. Otimização econômica de explorações a céu aberto. Revista Escola de Minas, v. 59, n. 3, p. 317–321, 2006.

CHIMUCO, J. P. J. Metodologia de planejamento de mina para retomada das operações de lavra das jazidas de Kassinga Norte. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

COSTA, R. M. Geoestatística aplicada à mineração. 2002.

- COSTA, R. R. Princípios da Engenharia de Minas. Rio de Janeiro: CETEM, 1979.
- DAVID, M. Geostatistical Ore Reserve Estimation. Amsterdam: Elsevier, 1977.
- FLORES, G. Planejamento de lavra: considerações econômicas e geotécnicas. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- FONTES, M. P. Influência do nível freático no sequenciamento de lavra. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- GIRODO, A. C.; PINTO, J. M. Apostila Planejamento da Produção Mineral. Belo Horizonte: IETEC, 2006.
- GODOY, M. C. Minimização de perdas em lavra seletiva. 1998. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.
- HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. Introductory Mining Engineering. 2. ed. New York: Wiley, 2002.
- HOCHBAUM, D. S.; CHEN, A. Performance analysis and best implementations of algorithms for the open pit mine problem. Operations Research, v. 48, n. 6, p. 894–914, 2000.
- HOCHBAUM, D. S. The Pseudoflow Algorithm: A New Algorithm for the Maximum Flow Problem. 2004.
- HUSTRULID, W.; KUCHTA, M. Open Pit Mine Planning and Design. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. A mineração brasileira e sua contribuição para o desenvolvimento sustentável. Brasília: IBRAM, 1996.
- KUNRAL, R.; DOWD, P. Mine Planning and Equipment Selection. 2005.
- LEE, J. C. Mine Planning and Design. 1984.
- MANDARINO, M. F. Análise de métodos para planejamento de curto prazo. 2018. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.
- MORALES, N. Robust Models for Simultaneous Open Pit and Underground Mines. INRIA, 2003.

NETO, R. F. Planejamento de Lavra com Otimização. Ouro Preto: UFOP, 2017.

OLIVEIRA, D. P. R. Planejamento Estratégico: Conceitos, Metodologias e Práticas. 23. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

PERONI, R. de L. Análise da sensibilidade do sequenciamento de lavra. 2002. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

PINTO, C. A.; DUTRA, J. G. Introdução ao Planejamento e Operação de Lavra. Belo Horizonte: Universidade Corporativa Chemtech, 2008.

POTVIN, Y. Strategic versus Tactical Approaches in Mining. Australian Centre for Geomechanics, 2006.

SILVA, N. C. S. Planejamento Estratégico de Lavra. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2008.

TOLWINSKI, B.; UNDERWOOD, R. A. A Scheduling Algorithm for Open Pit Mines. IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry, v. 7, n. 3, p. 247–270, 1996.

WETHERELT, A.; WIELEN, K. P. V. D. Introduction to Open-pit Mining. In: SME Mining Engineering Handbook. 3. ed. Littleton: SME, 2011. p. 857–876.

PwC – PricewaterhouseCoopers. *Mine 2022: A Critical Transition.* PwC Global, 2022. Disponível em: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/assets/pwc-mine-2022.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2025.