



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas - Escola de Minas



OTIMIZAÇÃO DO TEOR DE CORTE PARA MAXIMIZAÇÃO DO VALOR PRESENTE
LÍQUIDO (VPL) POR MEIO DE UM OTIMIZADOR GLOBAL

LUCAS HENRIQUE MIRANDA DE PAULA

OURO PRETO

2024

LUCAS HENRIQUE MIRANDA DE PAULA

**OTIMIZAÇÃO DO TEOR DE CORTE PARA MAXIMIZAÇÃO DO VALOR PRESENTE
LÍQUIDO (VPL) POR MEIO DE UM OTIMIZADOR GLOBAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Área de Concentração: Planejamento de Lavra

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (*DEMIN/EM/UFOP*)

OURO PRETO

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P324o Paula, Lucas Henrique Miranda de.
Otimização do teor de corte para maximização do valor presente líquido (VPL) por meio de um otimizador global. [manuscrito] / Lucas Henrique Miranda de Paula. - 2024.
94 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Planejamento de lavra. 2. Economia mineral - Teor de corte - Método de Lane. 3. Minas e recursos minerais - Otimização. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.013/015

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Henrique Miranda de Paula

Otimização do Teor de corte para maximização do Valor Presente Líquido (VPL) por meio de um Otimizador Global

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 10 de outubro de 2024

Membros da banca

Dr - Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
MSc. Belisario Ascarza Flores - Aura Minerals
Engº de Minas Fabio Vardanega - Deswik

Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/10/2024, às 23:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0795702** e o código CRC **4CD3D38B**.

*As minhas segundas Mães, Edna e Eliane de
Paula, que me criaram e ensinaram com muito
amor a procurar minha melhor versão e que por
destino da vida não puderam acompanhar essa
conquista de perto.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço meus pais, Luiz e Maria de Lourdes, por acompanharem as minhas conquistas concedendo suporte, amor e confiança, amo vocês.

Aos meus irmãos, Laís e Leonardo, pela cumplicidade e conselhos.

Aos meus avós, tios e tias, primos, amigos e a todos que presenciaram meu esforço e dedicação.

À Ouro Preto por me proporcionar as melhores experiências e vivências.

Aos meus amigos, Higor, Daniela, Antônio e Maria Clara pelo apoio e companheirismo ao longo de toda graduação. Obrigado por todos os momentos compartilhados.

À República Dominicana por ter se tornado meu lar e ser minha família em Ouro Preto, vocês foram fundamentais para minha formação como pessoa.

Ao professor Carlos Arroyo, meu orientador, por todo apoio, confiança e incentivo para a realização do projeto.

Ao Italo Koyama por todo suporte e conhecimento compartilhado para o desenvolvimento do projeto.

À Fundação Gorceix, Mining Team, Seminas, Minera Jr e Deswik pelo crescimento pessoal e profissional

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas, pelo ensino público, gratuito e de qualidade ao qual tive a oportunidade de vivenciar. Em especial ao Departamento de Engenharia de Minas.

RESUMO

A mineração desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico global, fornecendo matérias-primas essenciais para diversas indústrias. No entanto, à medida que os recursos minerais se tornam mais escassos e a pressão por operações mais eficientes aumenta, torna-se cada vez mais importante adotar estratégias de planejamento e otimização que garantam tanto a viabilidade econômica quanto a sustentabilidade ambiental das operações. No Planejamento de lavra, a definição do teor de corte, quantidade mínima de metal que torna o minério economicamente viável para ser extraído e processado, tem um impacto direto na vida útil da mina e nos retornos financeiros do projeto. A metodologia mais consolidada na teoria da definição do teor de corte ótimo é o Método de Lane, que leva em consideração não apenas os custos e recuperações de cada etapa de mineração processamento e refino, mas também suas capacidades. A aplicação deste método, combinada com algoritmos de otimização global, torna possível a criação de cenários que refletem com maior precisão as realidades operacionais e econômicas do setor minerário. Assim, este trabalho apresenta uma análise sobre a otimização do teor de corte visando a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) em projetos de mineração a céu aberto, utilizando o otimizador global *Deswik.GO*. A pesquisa explora três cenários: o sequenciamento tradicional, a aplicação de teor de corte dinâmico e a otimização do teor de corte com o uso de pilha de estoque. O objetivo central busca demonstrar como o ajuste dinâmico dos teores de corte pode aumentar a lucratividade e prolongar a vida útil da mina, assegurando operações minerárias mais eficientes e sustentáveis. Dessa forma o projeto contribui para o desenvolvimento de práticas mais avançadas de planejamento de lavra para uma melhor tomada de decisões operacionais e financeiras.

Palavras-chave: Planejamento Estratégico de Lavra, Teor de Corte, Método de Lane, Otimização.

ABSTRACT

Mining plays a crucial role in global economic development by providing essential raw materials for various industries. However, as mineral resources become scarcer and the pressure for more efficient operations increases, it becomes increasingly important to adopt planning and optimization strategies that ensure both the economic viability and environmental sustainability of mining operations. In mine planning, the definition of cut-off grade, the minimum amount of metal that makes the ore economically viable for extraction and processing, has a direct impact on the mine's lifespan and the financial returns of the project. The most established methodology in the theory of optimal cut-off grade determination is Lane's Method, which considers not only costs and recoveries for mining, processing and refining, but also its capacity constraints. The application of this method, combined with global optimization algorithms, makes it possible to create scenarios that more accurately reflect the operational and economic realities of the mining sector. Thus, this paper presents an analysis on the optimization of cut-off grades aimed at maximizing Net Present Value (NPV) in open pit mining projects, using the global optimizer Deswik.GO. The research explores three scenarios: traditional sequencing, the application of dynamic cut-off grades, and the optimization of cut-off grades with stockpiling. The main objective is to demonstrate how dynamically adjusting cut-off grades can increase profitability and extend the mine's lifespan, ensuring more efficient and sustainable mining operations. In this way, the project contributes to the development of more advanced mine planning practices for improved operational and financial decision-making.

Keywords: Strategic Mine Planning, Cut-off Grade, Lane's Method, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um modelo de blocos tridimensional	20
Figura 2 - Representação de Fluxo de Caixa.....	24
Figura 3 – Exemplo da relação entre VPL, Tempo e Recurso	27
Figura 4 – Exemplo de possíveis destinos dos materiais.....	32
Figura 5 – Exemplo da relação entre VPL, Custo de Oportunidade e Ano de lavra do minério	37
Figura 6 – Exemplo da relação entre Teor de Corte e Ano de lavra do minério.....	38
Figura 7 – Curvas de Valor <i>versus</i> Teor de Corte para os processos de Lavra e Tratamento..	45
Figura 8 - Teor de Corte de Equilíbrio entre os processos de Lavra e Tratamento	46
Figura 9 – Exemplo de curva Teor-tonelagem que ilustra o teor de corte do balanceamento lavra-tratamento.	48
Figura 10 - Exemplo de curva Teor-tonelagem que ilustra o teor de corte do balanceamento tratamento-refino.....	49
Figura 11 – Exemplo Teor de Corte Intermediário entre Lavra-Concentração	51
Figura 12 – Exemplo Teor de Corte Intermediário entre Concentração-Refino.....	52
Figura 13 – Exemplo Teor de Corte Intermediário entre Lavra-Refino.....	53
Figura 14 – Exemplo Teor de Corte Ótimo entre Lavra, Concentração e Refino.....	54
Figura 15 - Vista 3D do Modelo de Blocos.....	56
Figura 16 - Vista em Seção do Modelo de Blocos.....	57
Figura 17 - Vista de Topo das Fases	62
Figura 18 - Vista em Seção das Fases.....	63
Figura 19 – Vista 3D - Corpo de minério	63
Figura 20 - Vista Seção Longitudinal - Corpo de minério	64
Figura 21 - Vista Seção Transversal - Corpo de minério	65
Figura 22 – <i>Deswik.GO - Sink Rate</i>	67
Figura 23 - Fluxo de material do Cenário 1.....	68
Figura 24 - Fluxo de material do Cenário 2.....	69
Figura 25 - Fluxo de material do Cenário 3.....	70
Figura 26 - <i>Deswik.GO - Material Bins</i>	71
Figura 27 - Movimentação do material – Cenário 1	72
Figura 28 - Movimentação do material por fase – Cenário 1	73
Figura 29 – NSR da alimentação da planta – Cenário 1	74
Figura 30 - Política do teor de corte – Cenário 1	74
Figura 31 – Fluxo de Caixa – Cenário 1	75
Figura 32 - Fluxo de Caixa Descontado – Cenário 1	75
Figura 33 – Material movimentado – Cenário 2	77
Figura 34 – Massa movimentada por fase – Cenário 2.....	77
Figura 35 – Material movimentado para PDE – Cenário 2	78
Figura 36 – NSR da alimentação da planta – Cenário 2.....	79
Figura 37 – Política de teor de corte – Cenário 2.....	79
Figura 38 – Fluxo de caixa – Canário 2.....	81
Figura 39 - Fluxo de caixa descontado – Cenário 2.....	81
Figura 40 - Material Movimentado – Cenário 3.....	83
Figura 41 - Material movimentado por fase – Cenário 3.....	83
Figura 42 - NSR da alimentação da planta – Cenário 3.....	84
Figura 43 – Massa da Pilha de Estoque – Cenário 3.....	84
Figura 44 - Política do teor de corte – Cenário 3	85
Figura 45 - Fluxo de caixa – Cenário 3.....	86

Figura 46 - Fluxo de caixa descontado – Cenário 3.....	86
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os planejamentos de longo, médio e curto prazo.	17
Tabela 2 – Modelo do Método de Lane	40
Tabela 3 - Etapas do projeto	55
Tabela 4 - Informações Modelo de Blocos.....	55
Tabela 5 - Informações espaciais do Modelo de Blocos	56
Tabela 6 - Parâmetros Financeiros e Metalúrgicos	57
Tabela 7 - Cubagem das Fases - Minério	65
Tabela 8 - Cubagem das Fases - Estéril	66
Tabela 9 - Parâmetros financeiros.....	67
Tabela 10 - Resultados dos cenários	88

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	14
1.1.1. Objetivo Geral	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. PLANEJAMENTO DE LAVRA.....	16
2.1.1. Planejamento de Lavra de Longo Prazo	17
2.1.2. Modelo de Blocos.....	19
2.2. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS.....	21
2.2.1. Juros Simples e Juros Composto	21
2.2.2. Fluxo de Caixa	23
2.2.2.1. Valor Presente Líquido (VPL).....	25
2.2.2.2. Taxa Interna de Retorno (TIR).....	28
2.2.2.3. Payback.....	29
2.2.3. Índice de Lucratividade Anualizado (ILA).....	29
2.3. TEOR DE CORTE	30
2.3.1. Breakeven.....	33
2.3.2. Net Smelter Return (NSR)	34
2.3.3. Custo Oportunidade (Rendu).....	35
2.3.4. Método de Lane	38
2.3.4.1. Teores de Corte Limitantes.....	41
2.3.4.1.1. Limite de Lavra	42
2.3.4.1.2. Limite de Concentração	42
2.3.4.1.3. Limite de Refino.....	43
2.3.4.2. Balanceamento dos Teores de corte.....	43
2.3.4.2.1. Teor de Corte de Balanceamento Lavra-Concentração (g_{mc}).....	46
2.3.4.2.2. Teor de Corte de Balanceamento Concentração-Refino (g_{cr}).....	48
2.3.4.2.3. Teor de Corte de Balanceamento Lavra-Refino (g_{mr}).....	49
2.3.4.3. Teor de Corte Ótimo	50
3. METODOLOGIA	55
3.1. PARÂMETROS FINANCEIROS E METALÚRGICOS.....	57
3.2. CAMPOS FINANCEIROS DO MODELO DE BLOCOS E CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL	58
3.3. OTIMIZAÇÃO DE CAVA (<i>PSEUDOFLOW</i>) E SEQUENCIAMENTO DIRETO DOS BLOCOS	62
3.4. CENÁRIOS PARA MAXIMIZAÇÃO DO VPL	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1. CENÁRIO 1 – SEQUENCIAMENTO TRADICIONAL.....	72
4.2. CENÁRIO 2 - TEOR DE CORTE DINÂMICO.....	76
4.3. CENÁRIO 3 – OTIMIZAÇÃO TEOR DE CORTE COM PILHA DE ESTOQUE.....	82
5. CONCLUSÃO	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1. INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico global, fornecendo matérias-primas essenciais para diversas indústrias. No entanto, à medida que os recursos minerais se tornam mais escassos e a pressão por operações mais eficientes aumenta, torna-se cada vez mais importante adotar estratégias de planejamento e otimização que garantam tanto a viabilidade econômica quanto a sustentabilidade ambiental das operações. Nesse contexto, o planejamento de lavra, especialmente em minas a céu aberto, tem como um de seus principais objetivos a maximização do Valor Presente Líquido (VPL), que se refere ao valor atualizado dos fluxos de caixa futuros de um empreendimento minerário (Lane, 1988). Este processo envolve a otimização de diferentes variáveis, como o teor de corte, que é fundamental para determinar a viabilidade econômica de um depósito mineral.

O teor de corte, definido como a quantidade mínima de metal que torna o minério economicamente viável para ser extraído e processado, tem um impacto direto na vida útil da mina e nos retornos financeiros do projeto. Tradicionalmente, o teor de corte é definido de forma estática, sem considerar as variações nas condições econômicas e operacionais ao longo da vida útil do projeto. No entanto, de acordo com Rendu (2008), a aplicação de teores de corte dinâmicos, ajustados às condições econômicas e operacionais ao longo do tempo, pode maximizar significativamente o VPL de uma mina. Em vez de utilizar um teor de corte fixo, a abordagem dinâmica permite que o projeto se adapte às flutuações dos preços das *commodities*, custos operacionais e limitações de capacidade, oferecendo uma maior flexibilidade na tomada de decisões.

O método de Lane (1964) é amplamente reconhecido como uma das metodologias mais robustas para a definição do teor de corte ótimo, levando em consideração não apenas os custos e recuperações de cada etapa de mineração, processamento e refino, mas também suas capacidades. Ao integrar essas variáveis, o método de Lane permite uma análise mais precisa das interações entre as diferentes fases do processo de mineração, promovendo uma otimização global que pode resultar na maximização do VPL. A aplicação deste método, combinada com algoritmos de otimização global, torna possível a criação de cenários que refletem com maior precisão as realidades operacionais e econômicas do setor minerário.

Este trabalho tem como objetivo explorar a utilização de teores de corte dinâmicos para a maximização do VPL por meio de um otimizador global, o *Deswik.GO*. Para isso, o trabalho utilizou cinco fases de lavra já predefinidas e serão analisados três cenários distintos de otimização: sequenciamento tradicional, teor de corte dinâmico e otimização do teor de corte com pilha de estoque. Através dessa abordagem, pretende-se demonstrar como o ajuste dinâmico dos teores de corte pode aumentar a lucratividade e prolongar a vida útil da mina, garantindo uma operação mais sustentável e eficiente.

Dessa forma, a pesquisa visa contribuir para o desenvolvimento de práticas mais avançadas de planejamento de lavra, que considerem as dinâmicas econômicas do mercado de commodities e as variáveis operacionais. A aplicação de teor dinâmico apresenta-se como uma ferramenta estratégica essencial para gestores de projetos minerários, permitindo decisões mais assertivas e adaptáveis às condições de mercado, assegurando a viabilidade econômica e a sustentabilidade das operações minerárias no longo prazo, e garantindo o uso mais racional dos recursos minerais.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a aplicação de teores de corte dinâmicos para a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) em um projeto de mineração a céu aberto, por meio de um otimizador global. O estudo busca avaliar o impacto da variação dos teores de corte nas condições econômicas e operacionais, visando otimizar o desempenho financeiro e a sustentabilidade do projeto minerário.

1.1.2. Objetivos Específicos

- i. Analisar o conceito de teor de corte dinâmico e sua aplicação no planejamento de lavra de longo prazo, comparando-o com o teor de corte estático tradicional;
- ii. Implementar e avaliar três cenários distintos de otimização do teor de corte;
 - a. Cenário 1 – Sequenciamento tradicional.

- b. Cenário 2 – Teor de corte dinâmico.
 - c. Cenário 3 – Otimização do teor de corte com pilha de estoque.
- iii. Avaliar o impacto financeiro dos cenários propostos, com foco na maximização do VPL e na extensão da vida útil da mina;
 - iv. Explorar o uso do software *Deswik.GO* como ferramenta de otimização global, aplicando-o no planejamento de lavra e demonstrando suas capacidades para o ajuste dinâmico de teores de corte;
 - v. Contribuir para o desenvolvimento de práticas mais eficientes de planejamento de lavra, proporcionando aos gestores de projetos minerários ferramentas estratégicas para melhorar a tomada de decisões operacionais e financeiras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PLANEJAMENTO DE LAVRA

O planejamento de lavra está relacionado ao desenvolvimento estratégico das operações de mineração, com o objetivo de otimizar a extração de minério de maneira segura e eficiente. Esse planejamento envolve a definição dos métodos de extração, a sequência de lavra, a disposição dos rejeitos e outros aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

No planejamento estratégico de lavra, Lane (1988) propõe que os recursos a serem extraídos devem ser considerados como fontes finitas, ao qual apresentam uma extensão limitada de minério. Isso determina que a otimização da lavra se baseie em maximizar o VPL, mas as estratégias operacionais precisam levar em consideração, também, o fato de que as taxas de mineração afetam a vida útil da mina, segundo o autor. Ou seja, taxas mais altas possibilitam em uma vida útil menor, enquanto taxas mais baixas aumentam a vida útil da mina.

Além disso, no planejamento de lavra, o conhecimento geológico é fundamental, sendo representado por um modelo de blocos que possui informações com atributos quantitativos e qualitativos do recurso presente no local de estudo. Com isso, o modelo de blocos contribui para o desenvolvimento do planejamento de lavra “que consiste na estimativa de reserva e o sequenciamento de lavra de longo prazo para visar à definição da “geometria final ótima” da cava e dos períodos de lavra da mina, vida da mina - *LOM (Life of Mine)*”. (ALMEIDA, 2017)

Já Goodwin et al. (2006 apud Silva, 2008, p.14) afirmam que:

“Um estudo completo do planejamento de lavra envolve uma miríade de diversas questões e restrições. Dentre estas, podemos relacionar: restrições da capacidade da usina de beneficiamento; restrições geotécnicas; restrições ambientais; múltiplos destinos, com capacidades, taxas de produção e custos operacionais distintos; restrições de acessos e equipamentos; pilhas de estocagem para acomodar múltiplos materiais; preços variáveis dos produtos; questões de mistura do material a ser lavrado, de modo a alcançar o teor objetivo para a alimentação da usina de beneficiamento; incertezas na composição e quantidade do corpo mineralizado; variações dos preços dos produtos; entre outros.”

O planejamento de lavra, geralmente, é dividido em três horizontes, de acordo com o espaço temporal. Os horizontes podem ser classificados em Planejamento de Curto Prazo, Planejamento de Médio Prazo e Planejamento de Longo Prazo.

- i. Planejamento de Curto Prazo (Operacional): tem como principais objetivos controle de qualidade do material minerado; controle de custo; uso de equipamentos; e produtividade operacional, sendo limitado às metas do planejamento do longo prazo e podendo ser divididas em horizontes mensais, semanais e diárias. (SILVA, 2008)
- ii. Planejamento de Médio Prazo (Tático): trabalha com a implementação dos objetivos, estratégias e políticas definidas no planejamento estratégico, com o objetivo de usar os recursos de forma eficaz e eficiente para atingir os objetivos previamente definidos pela estratégia, bem como princípios para o processo de tomada de decisão da empresa. O planejamento de médio prazo envolve fases que incluem planos anual, semestral e trimestral. (ALMEIDA, 2017)
- iii. Planejamento de Longo Prazo (Estratégico): plano capaz de desenvolver uma estratégia de lavra e operação com os objetivos de maximizar os retornos financeiros para os investidores, minimizar os riscos e aumentar a vida útil da mina (SILVA, 2008). Esse planejamento será detalhado a seguir, visto que o estudo consiste em uma análise estratégica.

A Tabela 1 apresenta a comparação entre os horizontes citados acima.

Tabela 1 - Comparação entre os planejamentos de longo, médio e curto prazo.

Diferença	Planejamento Longo Prazo	Planejamento Médio Prazo	Planejamento Curto Prazo
Comportamento	Estratégico	Tático	Operacional
Riscos	Grandes	Médios	Pequenos
Flexibilidade	Pequena	Média	Grande

Fonte: Adaptado de Ascarza (2008 apud Almeida, 2017)

2.1.1. Planejamento de Lavra de Longo Prazo

O planejamento de lavra de longo prazo é uma etapa fundamental na gestão de uma mina, visando otimizar a produção e a rentabilidade do empreendimento ao longo do tempo. Nesse sentido, esse planejamento é considerado estratégico pois apresenta uma visão analítica que garante a competitividade da empresa no mercado. Segundo Hax (1991 apud Calaes, 2006) a estratégia pode ser definida como todas as atividades críticas da empresa, dando-lhe um

sentido de unidade, direção e propósito, ao mesmo tempo que facilita a implementação de mudanças induzidas pelo ambiente. A seguir alguns atributos que a estratégia incorpora segundo Calaes (2006, p. 39):

- i. Padrão de decisão coerente, unificador e integrativo.
- ii. Meio de estabelecimento do propósito da organização, em termos de seus objetivos de longo prazo, programas de ação e prioridades de alocação de recursos.
- iii. Delimitação do domínio competitivo da empresa.
- iv. Reação às ameaças e oportunidades externas e às forças e fraquezas internas, na busca de vantagens competitivas.
- v. Meio de diferenciação das funções gerenciais de níveis corporativos, unidades de negócios e funcionais.
- vi. Expressão das contribuições econômicas e não econômicas que a empresa pretende oferecer aos seus *stakeholders*.

O principal objetivo do planejamento estratégico da lavra está na definição da cava final ótima, que juntamente com o sequenciamento da lavra, será responsável por “maximizar o retorno financeiro através da extração do minério, reduzindo-se os custos e garantindo a lucratividade do empreendimento durante sua vida útil.” (NETO e FONTES, 2017, p. 2). Em relação aos limites da cava, Faria (2016) afirma que com o tempo a cava final deve ser atualizada para acomodar novas situações, tais como mudanças na economia, melhor conhecimento da reserva e melhorias na tecnologia mineira.

Existem diversas abordagens e metodologias para realizar o planejamento de lavra de longo prazo, que podem variar de acordo com as características de cada empreendimento e do minério explorado. De maneira geral, o processo do sequenciamento envolve a definição de fases ou estágios de lavra (*pushbacks*), a determinação da sequência de extração dos blocos, a vida útil da mina por meio da capacidade produtiva (PERONI, 2002), a estimativa de custos e a projeção de fluxos de caixa.

Para variáveis importantes do projeto, como flutuações de preços do minério e de custos, mudanças de teor/reserva, recuperação metalúrgica, ângulos geotécnicos etc., deve ser realizado a análise de sensibilidade e de risco de acordo com as mudanças que podem ocorrer no mercado e no próprio projeto (CAMPOS, 2017). Além do mais, no ponto de vista físico e estrutural, segundo o autor, planejar as instalações, na medida que se delimita a jazida, é fundamental para ter em funcionamento das operações da mina, como as plantas de processamento, pilhas de estéril e barragens de rejeito.

Portanto, é fundamental que as empresas do setor minerador invistam na elaboração de um planejamento de lavra de longo prazo sólido e bem estruturado, que leve em consideração as diversas variáveis envolvidas no processo de extração mineral. Essa prática contribui para a sustentabilidade do negócio, para a preservação do meio ambiente e para o desenvolvimento socioeconômico das regiões onde as operações são realizadas.

2.1.2. Modelo de Blocos

O modelo de blocos consiste em um método capaz de “discretizar o corpo mineral em um conjunto de pequenos blocos conceituais” (PERONI, 2002, p.25). Para Araujo (2019 apud Castanheira, 2021, p.19) “é uma forma de discretização do espaço definido por um sistema de coordenadas com intuito de facilitar a localização de cada bloco...”. Já para definir os limites de um corpo mineral Campos (2017) aborda a utilização pela indústria de modelos tridimensionais que interpretam seções geológicas por meio de base de dados coletadas na etapa de pesquisa mineral, em que essas informações permitem demarcar os limites dos corpos geológicos, como pode ser visto na Figura 1.

Saydam & Yalcin (2002, apud Peroni, 2002, p. 25) mencionam que no planejamento de lavra o uso de modelo de blocos é necessário e envolve os seguintes pontos:

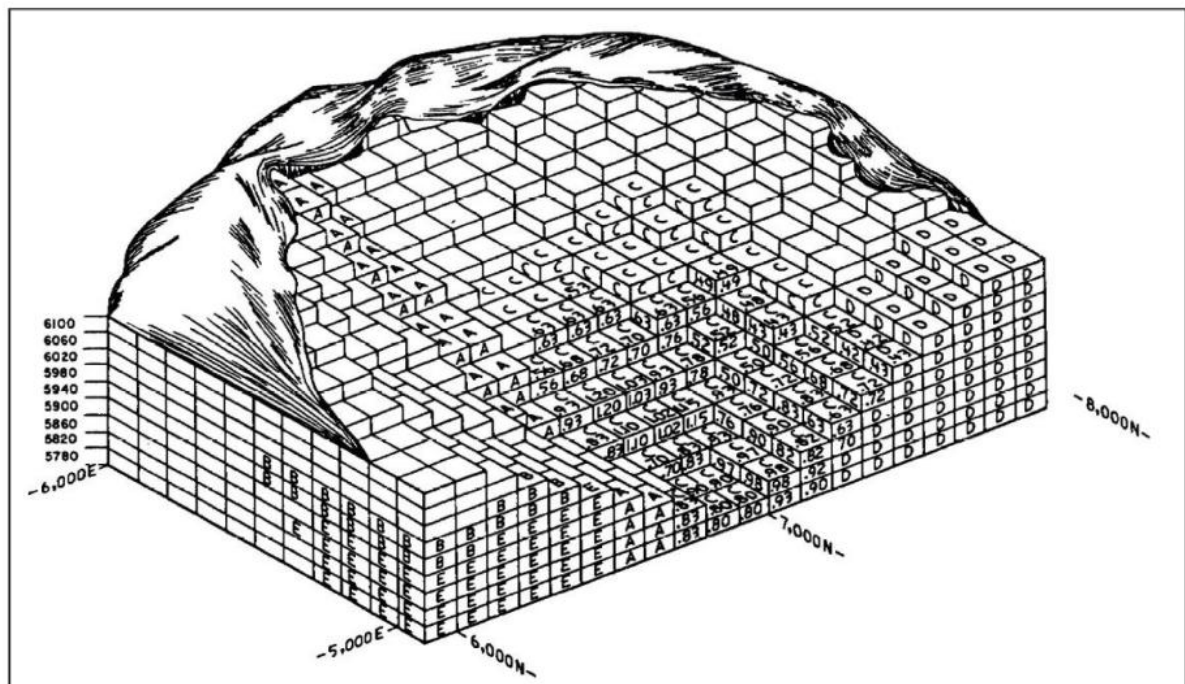
- i. decisão se um bloco do modelo deve ser minerado ou não;
- ii. se for minerado quando será minerado;
- iii. uma vez minerado então quando deverá ser enviado ao processo.

O modelo de blocos contém informações que podem ser utilizadas nas operações de mineração para elaboração de planos de lavra de curto, médio e longo prazo. Quanto menor o

horizonte temporal do sequenciamento mais detalhado se encontra o modelo de blocos, uma vez que a tomada de decisão se torna mais precisa e necessária. Esse detalhamento se dá por meio de constantes atualizações nos modelos e planos de lavra por meio do uso de computadores e softwares, o que garante a análise de sensibilidade (FARIA, 2016).

Além da localização espacial e dimensões dos blocos, um arquivo de modelo de blocos pode conter outras informações relevantes, como estimativas de teores, densidade, litologia, diluição, granulometria, dentre outros atributos. A partir dessas informações são calculados os atributos econômicos para os blocos que serão utilizados no planejamento da lavra, otimização da cava e sequenciamento da mina (CAMPOS, 2017). Já em relação às dimensões dos blocos alguns fatores são levados em consideração, como capacidades de equipamento, estruturas geológicas, exatidão nas informações geológicas, método de lavra, altura dos bancos, entre outras (CAMPOS, 2017).

Figura 1 - Representação de um modelo de blocos tridimensional



Fonte: Sinclair e Blackwell (2004)

2.2. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS

A viabilidade financeira de um projeto é realizada por meio de uma avaliação econômica que irá garantir a possibilidade decisória de investimentos. Os modos de investimento variam de acordo com o risco atrelado, em que os lucros reais de um investimento podem ser diferentes dos lucros esperados (GTIMAN e JOEHNK, 2005). Por meio desta análise, é possível mensurar os custos e benefícios envolvidos em um potencial projeto, bem como o impacto financeiro que ele terá sobre a empresa.

De acordo com Neto (2014) tomar decisões de investimento exige a preparação, avaliação e seleção de propostas de aplicação de capital com o objetivo de gerar benefícios no médio e longo prazo, de modo a mensurar os fluxos de caixa incrementais e avaliar a atratividade econômica das propostas por meio da comparação com o custo do dinheiro. Neste processo, o autor afirma que é importante compreender os princípios de formação e utilização das taxas de juro de mercado, que são utilizadas pelas empresas para ajustar os seus padrões de investimento ao longo do tempo.

Na mineração não é diferente, visto que os projetos de viabilidade das minas precisam apresentar uma receita favorável capaz de retornar aos acionistas um lucro sobre o investimento realizado para o desenvolvimento das atividades com base em aspectos tecnológicos, econômicos, mercadológicos, políticos, sociais, ambientais e de risco que o empreendimento está inserido. Segundo Silva (2008), um planejamento estratégico da lavra detalhado está sendo a grande procura pelos investidores que priorizam projetos que apresentam estimativas de ganhos e riscos mais detalhadas e abrangentes. Isso permite com que os acionistas tenham uma segurança a respeito da rentabilidade que o investimento proporcionará ao longo do tempo.

2.2.1. Juros Simples e Juros Composto

Estudar e analisar as variações do valor do dinheiro ao longo do tempo é o grande propósito da matemática financeira, uma vez que adiantar os retornos dos investimentos hoje se torna diferente de receber esse retorno no futuro (NETO, 2022). Para Ferreira e Andrade (2010), o valor do dinheiro no tempo é o conceito de que uma unidade monetária no presente tem um valor maior do que a mesma quantidade no futuro. Com isso, Neto (2022) conclui que tomar a decisão de adiar o recebimento do dinheiro requer riscos que devem ser compensados por este atraso.

A compensação pelo adiamento de um pagamento é medida pela taxa de juros, também conhecida como taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade. Ferreira e Andrade (2010) afirmam que a taxa é utilizada para calcular o valor do dinheiro no tempo e determinar o montante futuro equivalente a um determinado valor, sendo utilizada nas técnicas de análise econômica que utilizam o fluxo de caixa descontado. Assim, a compreensão dos diferentes tipos de juros, como simples e compostos, é essencial para a análise apropriada dos custos envolvidos na obtenção de capital.

Os juros simples ou lineares são aplicados apenas ao capital inicial e geram remunerações diretamente proporcionais ao capital e prazo envolvidos na operação, não sendo calculados juros sobre os juros acumulados.

Os juros simples podem ser calculados pela Equação (1).

$$J = C * i * n \quad (1)$$

Onde,

J – Valor monetário dos juros;

C – Capital;

i – Taxa de juros;

n – Prazo.

Já os juros compostos ou exponenciais são um sistema amplamente utilizado em operações financeiras de médio e longo prazos. Diferente dos juros simples, nesse regime os juros são calculados sobre o montante acumulado, levando em consideração os juros gerados em períodos anteriores. Para (NETO, 2022), esse processo de formação dos juros permite a acumulação de juros sobre juros, resultando em uma maior remuneração ao longo do tempo.

O regime de juros compostos possui uma vantagem técnica em relação aos juros simples, pois permite o fracionamento dos prazos e a equivalência entre capitais em qualquer data (NETO, 2022). Isso torna o cálculo dos juros mais condizente com o mercado, proporcionando uma melhor compreensão das operações financeiras.

O juro composto pode ser calculado pela Equação (4).

$$FV = PV * (1 + i)^n \quad (2)$$

$$J = FV - PV \quad (3)$$

$$J = PV * [(1 + i)^n - 1] \quad (4)$$

Onde,

PV – Valor presente (capital);

FV – Valor futuro (montante).

A taxa de juros é um fator determinante na viabilidade econômica dos projetos de mineração, impactando diretamente no custo do capital e na atratividade de investimentos, sendo aplicado na avaliação de riscos financeiros no setor. Changanane (2017) afirma que os bens minerais não escapam da influência da lei da oferta e demanda, intervenções econômicas e restrições legais que podem implicar em riscos e incertezas na previsão dos preços de venda desses bens. Assim, a incerteza dos preços das commodities minerais e o potencial de flutuações cambiais podem afetar significativamente a rentabilidade dos investimentos, sendo necessário a determinação e análise cautelosa das taxas de juros e sua relação com os riscos envolvidos nos projetos para uma tomada de decisão eficaz.

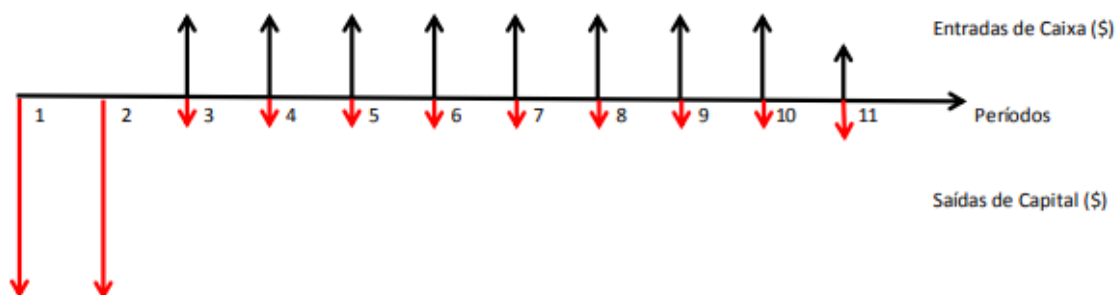
2.2.2. Fluxo de Caixa

O fluxo de caixa pode ser compreendido como todas as saídas e entradas de valores dentro de uma análise de investimento. Para Lorentz (2012) trata-se de um quadro síntese que representa todas as movimentações financeiras de entradas e saídas de recursos previstas para um determinado período. As receitas compreendem os fluxos de caixa positivos, já os custos do projeto equivalem aos fluxos de caixa negativos (LOBO, 2023).

Para Almeida (2017), o fluxo de caixa é importante para determinar se um negócio consegue gerar renda suficiente para cumprir suas obrigações financeiras e obter lucro, de modo a auxiliar em um melhor planejamento dos recursos financeiros disponíveis para serem aplicados ao longo do tempo. Já Bressan (2008 apud Assis, 2016) menciona que as quatro dimensões do capital podem ser representadas de forma prática pelo fluxo de caixa, sendo essas

dimensões compreendidas por Assis (2016) como, moeda, valor, tempo e direção (Pagamento ou Recebimento). A Figura 2 apresenta uma esquematização referente ao fluxo de caixa, sendo que o autor afirma que a soma simples das entradas e saídas no período estudado compreende o valor total do fluxo de caixa.

Figura 2 - Representação de Fluxo de Caixa



Fonte: Bressan (2008 apud Assis, 2016)

A confiabilidade dos resultados de um investimento está diretamente ligada à precisão com que se projeta os fluxos de entradas e saídas de caixa, sendo fundamental também entender como esses fluxos serão distribuídos ao longo do tempo (NETO, 2014). Para isso, as análises econômicas levam em consideração o Fluxo de Caixa Descontado (FCD), que, por sua vez, considera o valor do dinheiro no tempo.

Para Almeida (2017) o método de FCD é uma ferramenta importante que auxilia na tomada de decisões eficientes para avaliar projetos de investimento, possibilitando a previsibilidade do aumento de valor do projeto e os riscos envolvidos ao longo do tempo. Entretanto, para Whittle (2005), ao analisar o FCD, a compreensão de que o dinheiro desvaloriza com o tempo deve ser levada em consideração, uma vez que são aplicadas taxas de descontos que aumentam nos fluxos de caixa futuros.

Para definir o valor de uma empresa Póvoa (2004 apud Almeida, 2017, p.15) afirma alguns pontos que devem ser levados em consideração:

- i. Projetar os fluxos de caixa da empresa para os próximos anos;

- ii. Fixar uma taxa de desconto que reflita da forma mais fiel possível os riscos envolvidos no projeto;
- iii. Trazer a valor presente, utilizando a taxa de desconto encontrada, os fluxos de caixa projetados.

O chamado valor do dinheiro no tempo surge dos juros existentes, que podem ser definidos como o lucro obtido em investimentos de capital e possuem uma relação entre o dinheiro ganho e o dinheiro investido no início do período, que, por sua vez, esse período pode ser mensal ou anual (LORENTZ, 2012). Para Souza (2016), o FCD é utilizado para estimar o retorno esperado de um empreendimento mineral, em que o método aplica um fator de desconto financeiro ao minério extraído em um período posterior ao início do empreendimento, de modo a trazer o valor desse minério para o ano zero. O autor afirma que isso permite que todos os blocos de minério sejam comparados, uma vez que estão na mesma base de tempo e, ao realizar o somatório desses blocos, é possível determinar o valor presente líquido do empreendimento.

Sendo assim, um dos principais conceitos relacionados à influência do tempo na avaliação econômica de investimentos minerários é o fluxo de caixa descontado. O FCD permite avaliar não apenas o montante de fluxos de caixa futuros esperados, mas também o seu valor presente líquido (VPL), que é o valor presente dos fluxos de caixa futuros descontados a uma taxa de desconto apropriada.

2.2.2.1. Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL) é um indicador amplamente utilizada no planejamento estratégico de lavra com intuito de analisar se o projeto é economicamente viável ou não. Segundo Lane (1988), o VPL pode ser calculado como o total dos fluxos de caixa futuros descontados de volta ao presente. Além disso, o autor conclui que a análise da estratégia do teor de corte requer a verificação da maximização do valor presente para uma operação baseada em um recurso finito. Diante disso, a otimização do VPL dos fluxos de caixa futuros está relacionada diretamente com a otimização do teor de corte, sendo um dos principais objetivos dos projetos desenvolvidos (RENDU, 2008).

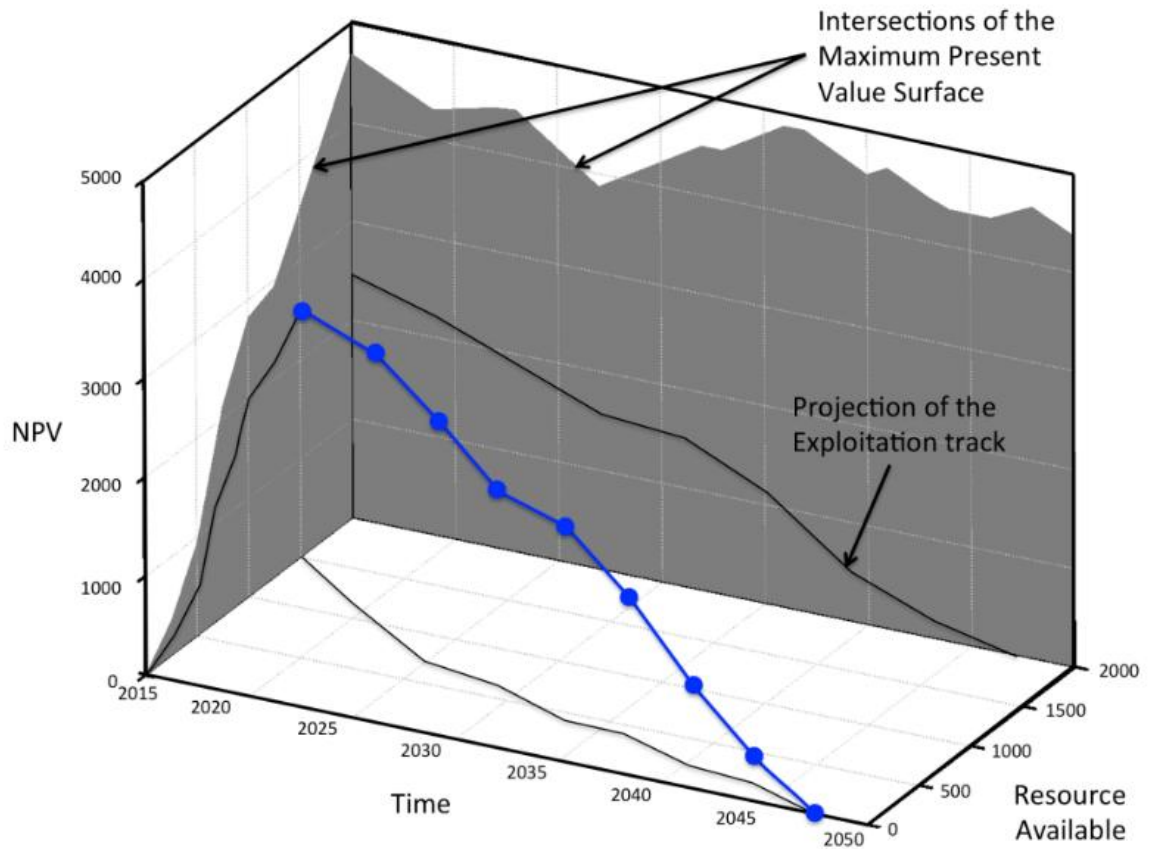
Para atingir esse objetivo, Rendu (2008) argumenta da importância de levar em consideração variáveis de natureza espaço-temporal, como as características geográficas e

geológicas do depósito, e do sequenciamento de lavra e processamento do material, bem como o fluxo de caixa resultante. Como medida para a otimização dos teores de corte, metodologias matemáticas foram criadas e são aplicadas para a tomada de decisões.

Vale ressaltar que a influência do tempo é um fator determinante para o planejamento estratégico de lavra. Como mencionado por Juvenal *et al* (2020), as condições econômicas, de mercado e demandas industriais podem variar ao longo do tempo, influenciando na quantificação e qualificação das reservas minerais e conseqüentemente nos resultados obtidos através do VPL. Portanto, é essencial realizar atualizações periódicas do planejamento estratégico, levando em consideração as mudanças do contexto em que o empreendimento está inserido.

Segundo Lane (1988), o VPL é controlado por algumas variáveis. Dentre as variáveis independentes está o Tempo e os Recursos Avaliados que são fundamentais para a determinação do VPL de um projeto. O Tempo é uma variável incontrolável que influencia nas projeções de preços e custos, o que promove variações nas estimativas do valor presente ao longo dos períodos, até mesmo para a mesma disponibilidade de recursos. Além disso, essa variável consiste na data presente que o VPL se baseia, sendo a partir dela que os fluxos de caixa são descontados. Já os Recursos tendem a diminuir na medida que as operações e o tempo progridem e novos recursos não são avaliados, influenciando no cálculo dos VPL futuros. A Figura 3, mostra um exemplo da relação entre VPL, Tempo e Recurso.

Figura 3 – Exemplo da relação entre VPL, Tempo e Recurso



Fonte: Lane (1988)

A metodologia do VPL considera o valor do dinheiro no tempo, sendo uma técnica do Fluxo de Caixa Descontado (FCD) (PESSOA, 2006).

Assim, o cálculo do VPL de um projeto é determinado por meio da Equação 5.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} - C \quad (5)$$

Onde,

VPL – Valor Presente Líquido;

n – Período de vida útil;

R_t – Fluxo de caixa no tempo t;

t – Tempo, período do fluxo caixa;

C – Investimento Inicial;

i – Taxa de Desconto (taxa de juros).

Alguns critérios são adotados para classificar os projetos e tomar decisões.

- i. $VPL > 0$ – projeto rentável com decisão de investimento;
- ii. $VPL < 0$ – projeto não rentável com decisão de não investir.

Pessoa (2006, p. 60) afirma que “o VPL maior que zero significa que a empresa obterá um retorno maior que seu custo de capital, aumentando assim o valor de mercado da empresa e a riqueza dos acionistas.” Porém, o autor conclui que o método convencional de VPL não é capaz de reconhecer adequadamente o valor das ações gerenciais ao se adaptar às condições variáveis do mercado, pois não considera as opções reais presente nos projetos.

2.2.2.2. Taxa Interna de Retorno (TIR)

Quando o VPL se iguala a zero ($VPL = 0$) temos a definição da Taxa Interna de Retorno (TIR), compreendida por Almeida (2017) como a taxa de desconto que permite que o VPL de um projeto seja nulo, assegurando a recuperação dos investimentos feitos no final da vida útil do empreendimento. Sendo assim, um requisito essencial para o investimento ser considerado aceitável é que a TIR deve ser igual ou superior à taxa de desconto (CORREA, 2020).

Whittle (2005) determina o cálculo do TIR para um valor de i com a Equação 6.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} - C \quad (6)$$

Para Pessoa (2006) a metodologia TIR apresenta compreensão e comunicação fácil, sendo correlacionada com o VPL o que garante a mesma tomada de decisão. Já como empecilhos, o autor afirma que um projeto pode apresentar mais de uma taxa de desconto que iguala a zero o VPL de um investimento se e somente se os fluxos de caixa apresentarem mais de uma inversão de sinal (-, +, -), além de que decisões podem ser errôneas quando se tem

comparação de projetos que são mutuamente excludentes, ou seja, não podem ocorrer simultaneamente.

2.2.2.3. *Payback*

O *Payback* ou Período de Retorno consiste em calcular o tempo necessário que o investimento inicial será recuperado. Em outras palavras, o *payback* pode ser definido como o período em anos que o projeto decorrerá até que os fluxos de caixa acumulados estimados igualem o valor inicial do investimento (BREALEY, MYERS, ALLEN, 2013).

Para Almeida (2017) não se deve considerar o projeto viável apenas por apresentar um período de retorno menor. Assim, torna-se necessário realizar a análise de outras metodologias, já que o *payback* é um indicador de risco e não um método de avaliação Souza (1995 apud Almeida, 2017). Hall (2014) afirma que é necessário utilizar o *payback* com outras medidas de valor para garantir uma visão mais ampla sobre o comportamento do projeto.

Como vantagens, o *payback* apresenta fácil compreensão, considera as incertezas de fluxos de caixas mais distantes e possui um viés em favor da liquidez (PESSOA, 2006). Em relação às desvantagens, o autor exemplifica a não consideração do valor do dinheiro no tempo, ignora fluxos de caixa além da data de corte e tem um viés contra projetos de longo prazo. Para Hall (2014) a maior desvantagem do *payback* está no fato de ignorar os fluxos de caixa após o período de recuperação dos investimentos, não sendo considerado um método que maximize o VPL.

2.2.3. Índice de Lucratividade Anualizado (ILA)

O Índice de Lucratividade Anualizado (ILA) é classificado como um método não convencional e, de acordo com Franco e Gali (2007, p. 5), o método permite “distribuir anualmente o valor do VPL por unidade de investimento do projeto, durante toda a sua vida útil, ou seja, é um derivativo de segunda ordem do Valor Presente Líquido e tem como objetivo solucionar simultaneamente as duas limitações do VPL: projetos com investimento e prazo diferentes”

Os autores ainda afirmam que, ao usar o ILA a necessidade de fazer atualizações ao classificar projetos de prazos diferentes não é característica do método, de modo que

proporciona uma análise sem ter a comparação do VPL e a avaliação do fluxo de caixa incremental dos projetos. O cálculo do ILA pode ser expresso pela Equação 7.

$$ILA = \left\{ \frac{\left[\sum_{t=1}^n \frac{R_t - D_t}{(1+i)^t} \right] \cdot i}{\left[\sum_{t=1}^n \frac{D_t}{(1+i)^t} \right] \cdot [1 - (1+i)^{-n}]} \right\} \quad (7)$$

Onde,

ILA – Índice de Lucratividade Anualizado.

R_t – entradas de caixa (receitas) esperadas durante o período t.

D_t – saídas de caixa (despesas) esperadas durante o período t.

i – taxa de juros ou taxa de desconto.

n – vida útil do projeto.

2.3. TEOR DE CORTE

Rendu (2008) define o teor de corte como a quantidade mínima necessária de metal valioso que determina se uma tonelada métrica de material deve ser processada como minério ou empilhada como estéril, sendo fundamental para o cálculo do VPL e a deliberação da vida útil do empreendimento mineral. Ademais, Rendu explicita que os teores de corte também são utilizados na decisão da rota de processamento do material extraído quando diferentes opções estão disponíveis, por exemplo lixiviação e flotação. Dessa forma, o cálculo do teor de corte proporciona grande impacto para o planejamento estratégico de lavra, visto que a sua mal determinação pode impactar na rentabilidade do projeto e até mesmo trazer como consequência a inviabilização da mina.

Para Lane (1988) determinar o teor de corte por meio de uma base econômica permite apresentar uma definição econômica do minério, no qual se deve levar em consideração toda a cadeia de valor que engloba os processos de mineração até o produto da usina e sua entrega aos clientes. A distinção entre minério e estéril é usualmente definida pelos ideais econômicos do mercado, sendo controlada e determinada pelo cálculo do teor de corte, que por sua vez leva em consideração variáveis econômicas, geológicas e operacionais. Essas variáveis, quando são

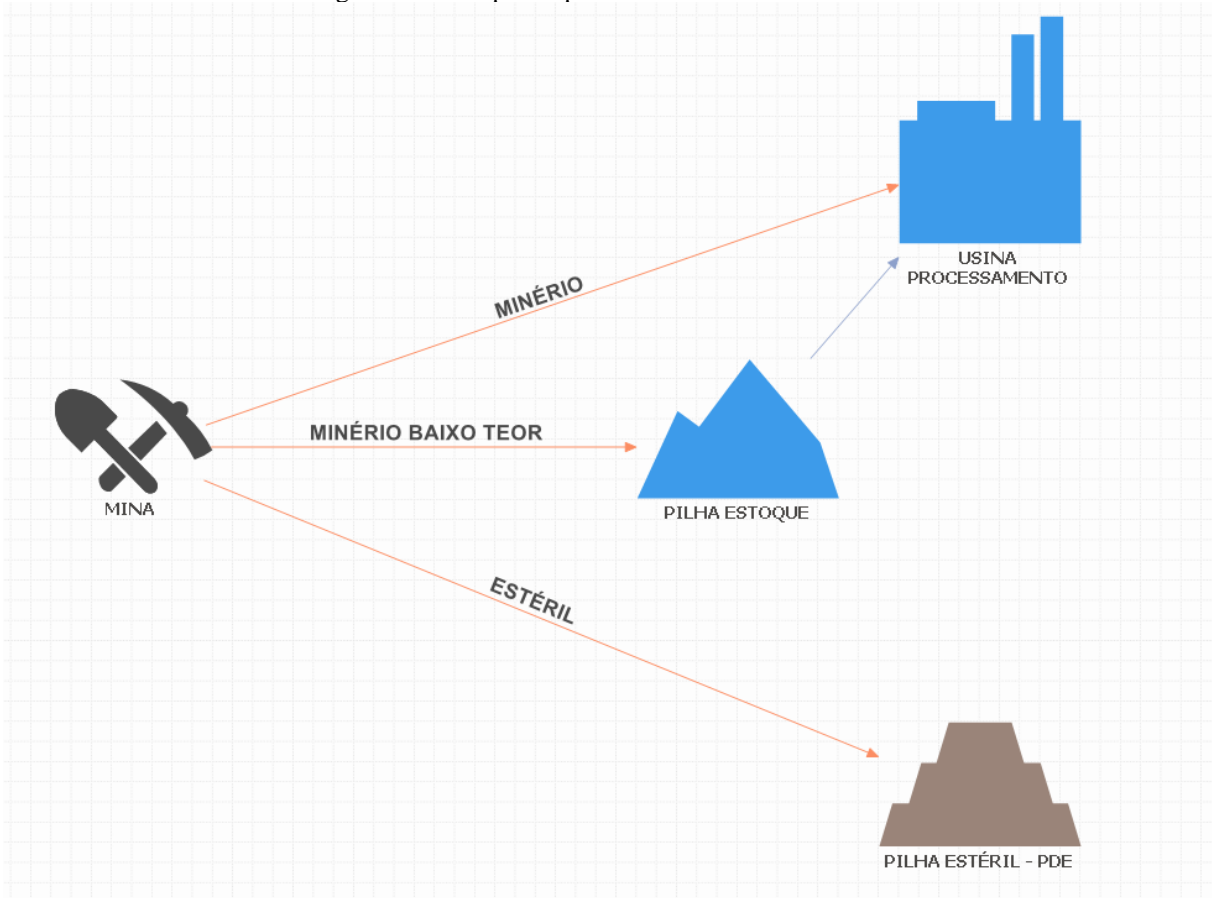
modificadas podem reclassificar blocos que antes eram minério para estéril e vice-versa (FONTOURA, 2017) e, assim, influenciar na viabilidade econômica do projeto.

De acordo com Oliveira, Souza e Silva (2022), os parâmetros são descritos como:

- i. Econômicos: englobam o preço de venda do metal/minério, custos de comercialização e/ou vendas, custos do processo mineral, custos fixos e a taxa de atratividade adotada no projeto.
- ii. Geológicos: proveniente das informações presentes no modelo de blocos por meio de atributos referentes à localização espacial, litologia, teor dos elementos de interesse e deletérios ao processamento e tonelagem associada a cada bloco pertencente ao modelo.
- iii. Operacionais: contemplam a capacidade de lavra, processamento, refino e recuperação metalúrgica e/ou mássica.

Além do mais, o teor de corte pode ser utilizado para determinar se o material deve ser armazenado para processamento futuro ou se deve ser processado imediatamente (RENDU, 2008). Essa afirmação pode ser representada na Figura 4, a qual esquematiza os possíveis destinos dos materiais classificados pelo teor de corte.

Figura 4 – Exemplo de possíveis destinos dos materiais



Fonte: próprio autor

Os teores de corte podem variar dependendo do tipo de minério ou depósito mineral, das tecnologias e equipamentos de processamento disponíveis, dos custos operacionais e da demanda do mercado. Segundo Assis (2016), de acordo com o propósito da operação, os teores de corte podem variar. Isso se deve ao fato de que, no cotidiano das mineradoras, as plantas de beneficiamento são capazes de processar determinadas faixas de teores, levando em consideração as condições das commodities no mercado.

Assim, algumas questões devem ser levadas em consideração para a tomada de decisão de quando aumentar ou diminuir o teor de corte. Rendu (2008) propõe:

- i. Aumentar quando os preços do metal aumentam, se isso for necessário para fortalecer a posição financeira da empresa e reduzir o risco de falência quando os preços do metal caírem. Como consequência, tem-se o aumento da lucratividade do curto prazo e do VPL do projeto, mas diminui a vida útil da mina reduzindo as oportunidades

dependentes do tempo, como as oferecidas pelos ciclos de preços, o que acarreta impactos socioeconômicos com redução de empregos de longo prazo e diminuição dos benefícios para funcionários e comunidades locais.

- ii. Reduzir durante períodos de preços altos para aumentar a vida útil da mina e manter o material de alto teor disponível para manter a lucratividade quando os preços caírem.

Dessa maneira, além de diferenciar o material minério e estéril nos projetos por meio do teor de corte, pode ser levado em consideração a determinação de teores de cortes dinâmicos, considerando o *breakeven*. Isso permite trazer uma maior lucratividade ao utilizar, no projeto, pilhas de estoque que permitem processar, em datas posteriores, o material com determinado teor, de acordo com a análise estratégica do mercado. Entretanto, para Rendu (2008) o armazenamento em pilha pode ter várias consequências. Dentre as positivas está o aumento da vida útil das instalações de processamento, já as negativas englobam o aumento do risco ambiental e diminuição da recuperação metalúrgica do material estocado.

2.3.1. Breakeven

O teor de corte de equilíbrio, conhecido como *Breakeven Cut Off Grade* – B_{COG} , é considerado por Souza (2016) como o teor mínimo que permite com que não se tenha ganhos nem prejuízos no projeto, ou seja, é o valor que faz com que a receita seja igual aos custos de produção, de modo que valores acima desse teor resultam em receitas superior aos custos. Para Rendu (2008), esse teor se refere a casos em que apenas os gastos operacionais diretos são considerados, sem levar em conta restrições de capacidade e custos de outras naturezas. Além disso, o autor afirma que os custos de oportunidade são ignorados e leva em consideração fluxos de caixa não descontado. Já para Hall (2014), os recursos que apresentam teor acima do *breakeven* devem ser classificados como minério, mas não se tornar necessariamente o teor de corte do projeto, visto que é apenas um método de determinação dos teores de corte.

O *breakeven* é considerado por Hall (2014) como um método de definição de teor de corte simples e limitado, sendo baseado apenas em parâmetros financeiros e na recuperação metalúrgica. Entretanto, Hall conclui que este método apresenta grande utilidade quando é usado nas restrições de um método de definição de teor de corte mais abrangente. Caso

contrário, o uso somente do *breakeven* pode acarretar análises equivocadas com planos de lavra que não estão alinhados com os objetivos da empresa.

Os custos levados em consideração para calcular o *breakeven* se referem aos custos de lavra, processamento e gerais e administrativos (G&A) da empresa, de maneira que o lucro obtido do material lavrado seja zero (NOBLE, 1993; LANE, 1998; HUISTRULID & KUTCHA, 1998 apud CARLI, 2013). De acordo com Changanane (2017) o *breakeven* pode ser calculado pela Equação 8.

$$B_{COG} = \frac{C_m + C_p + C_{G\&A}}{r(p - C_r)} \quad (8)$$

Onde,

C_m – Custo de mineração.

C_p – Custo de processamento.

$C_{G\&A}$ – Custos gerais e administrativos.

C_r – Custo de refino.

p – Preço de venda.

r – recuperação do metal (%).

2.3.2. *Net Smelter Return (NSR)*

Muitos empreendimentos minerários trabalham com depósitos poli metálicos que apresenta uma variedade de metais em concentrações economicamente viáveis. De acordo com Rendu (2008), a metodologia a ser utilizada para enviar o material a um possível destino ou processo deve levar em consideração o valor de cada metal, de forma que a definição do que é minério e estéril não pode ser baseada apenas no teor de corte e sim expressa em termos de Retorno Líquido da Fundição (NSR).

O *Net Smelter Return (NSR)* é considerado uma medida do valor do minério, que é definido como o retorno das vendas de concentrados após a dedução dos custos externos à mina relacionados ao transporte, tratamento e venda desses produtos (GOLDIE E TREDGER, 1991),

sendo expresso em dólares por tonelada métrica de minério. Além disso, muitos fatores, como custos de processamento, recuperações e características geológicas, influenciam o cálculo do teor de corte, além de que os contratos de fundição penalizam concentrados com excesso de elementos deletérios específicos e excluem os custos de mineração e processamento (RENDU, 2008).

O NSR é uma métrica essencial para avaliar a viabilidade econômica de um projeto de mineração que possui, principalmente, depósitos poli metálicos. A diversidade de metais em depósitos poli metálicos também pode influenciar a volatilidade do NSR ao longo do tempo, visto que os preços dos metais estão sujeitos a flutuações no mercado global, e as mudanças nos preços de um ou mais metais podem ter um impacto significativo no NSR e, conseqüentemente, na viabilidade econômica do projeto. Assim, o cálculo preciso do NSR requer uma compreensão detalhada da composição do minério, dos preços de mercado dos metais e dos custos operacionais associados à sua extração e processamento.

2.3.3. Custo Oportunidade (Rendu)

Para a explicação do custo de oportunidade, será levado em consideração o estudo realizado por Rendu (2008). Com isso, Souza (2016) afirma que Rendu adota o termo utilidade direta para definir o *Breakeven* e obter uma quantidade de benefício direto. Assim, pode-se exemplificar, não considerando restrições de capacidade, a comparação entre duas rotinas alternadas diferentes por meio da Equação 9.

$$U_1 \text{ dir}(x_c) = U_2 \text{ dir}(x_c) \quad (9)$$

Sendo que $U_1 \text{ dir}(x_c)$ é o benefício direto em função considerando o material pela alternativa 1 e $U_2 \text{ dir}(x_c)$ é o benefício direto em função do *breakeven* de tratar o material pela alternativa 2. Assim, inúmeros *breakeven* podem ser definidos, basta apenas igualar o benefício obtido entre duas alternativas (SOUZA, 2016).

Rendu propõe que ao estimar teores de corte, todas as variáveis de controle devem ser levadas em consideração. Para facilitar esse processo, a utilidade $U(x)$ de enviar material de teor x para um determinado processo é expressa, Equação 10, como a soma de três partes.

$$U(x) = U_{dir}(x) + U_{opp}(x) + U_{oth}(x) \quad (10)$$

Onde,

$U_{dir}(x)$ - lucro ou prejuízo direto que será incorrido no processamento do material.

$U_{opp}(x)$ - custo de oportunidade ou benefício de aumentar a quantidade de material a ser processado.

$U_{oth}(x)$ - outros fatores que devem ser levados em consideração, mas que podem não ser quantificáveis.

Os custos de oportunidade são considerados quando se tem uma massa de material acima da planejada para ser lavrada e processada, ou seja, se as instalações de mina, usina e refino tiverem capacidade limitada e se o aumento de material a ser processado influenciar nos fluxos de caixa anteriormente esperados. Com isso, a restrição de capacidade faz com que o custo de oportunidade inclua os custos de movimentação de material já programado para processamento e adiamento do processamento desse material.

Como exemplificação, tem-se que se for necessário adicionar uma nova tonelada métrica de material à planta de processamento, o processamento do material originalmente planejado será adiado pelo tempo necessário para processar a tonelada adicional e, portanto, terá o custo de oportunidade. Sendo assim, o processamento de uma tonelada métrica de material requer um certo período e a adição de uma nova tonelada métrica hoje resultará em uma diminuição no VPL dos fluxos de caixa futuros a uma taxa de desconto. Portanto, Rendu (2008) afirma que o custo de oportunidade de adicionar uma tonelada métrica de material a uma operação com capacidade limitada pode ser calculado pela Equação 11.

$$U_{opp}(x) = -t.i.VPL \quad (11)$$

Onde,

t – tempo necessário para processar o material adicional.

i – taxa de desconto utilizada no cálculo do VPL planejado.

VPL – Valor Presente Líquido planejado.

Rendu propõe os seguintes pontos que devem ser levados em consideração:

- i. O custo de oportunidade deve ser somado ao custo direto do processo que tem capacidade limitada;
- ii. Se o minério adicional for enviado para uma usina com capacidade limitada, t é o tempo necessário para processar essa massa e o custo de oportunidade deve ser adicionado ao custo de processamento P ;
- iii. Se o processo de refino for limitado por capacidade, t é o tempo necessário para refinar o concentrado produzido a partir da massa de material no grau x , e o custo de oportunidade deve ser adicionado ao custo de refino R .

A seguir estão algumas figuras que permitem relacionar VPL, Custo de Oportunidade, teor de corte e ano em que o minério é extraído. Na Figura 5 é possível concluir que na medida que a vida útil do projeto vai passando, menor será o VPL e o custo de oportunidade, portanto, teores de corte em declínio devem ser usadas para maximizar o VPL, como na Figura 6 em que o custo de oportunidade se torna diretamente proporcional ao teor de corte.

Figura 5 – Exemplo da relação entre VPL, Custo de Oportunidade e Ano de lavra do minério

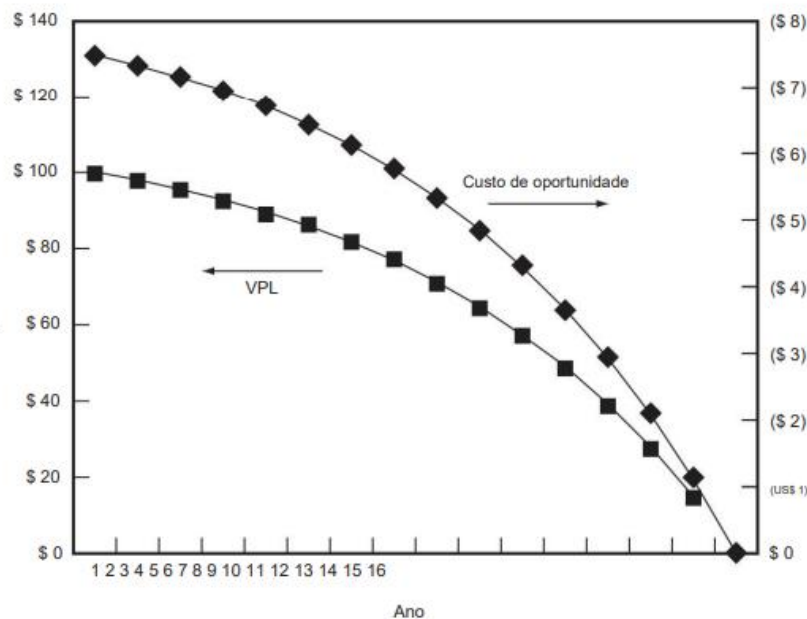
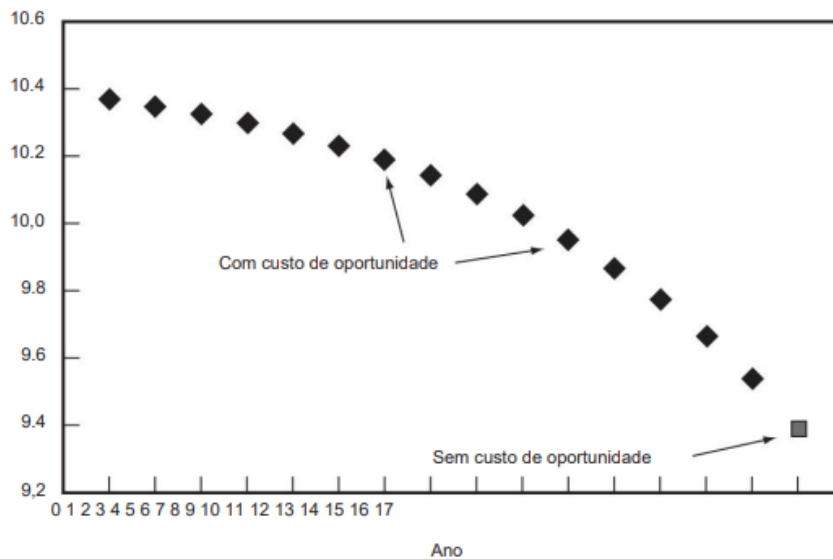


Figura 6 – Exemplo da relação entre Teor de Corte e Ano de lavra do minério



Fonte: Rendu (2008)

Segundo Rendu, o ideal nos projetos é que os teores de corte e os fluxos de caixa devem convergir para valores consistentes. Isso se dá quando os custos de oportunidade começam a serem utilizados para reestimar novos teores de corte que conseqüentemente estima novos planos de mina e fluxos de caixa, se tornando um ciclo que permite utilizar os custos de oportunidade para otimizar o teor de corte e o fluxo de caixa. Além disso, a constante atualização dos planos de lavra (teor de corte) deve ser realizada, uma vez que é esperado mudanças nos custos, preços de venda e no desempenho da mina e da usina que influenciarão no fluxo de caixa futuro e nos custos de oportunidade.

2.3.4. Método de Lane

O método de Lane foi proposto como uma solução para otimizar o teor de corte. Segundo Changanane (2017, p.42) “o modelo mais abrangente de determinação da estratégia ótima do teor de corte que maximize o valor presente líquido dos fluxos de caixa foi desenvolvido por Lane”. Lane (1964) propôs um método mais amplo de teor de corte capaz de maximizar o VPL por meio de operações ideais que consiste em processos de lavra, concentração e refino do material.

Esses processos podem ser definidos, de acordo com Hall (2014), como:

- i. Lavra: consiste em processos para lavar material (minério + estéril);
- ii. Concentração: consiste em processos que englobam a usina;
- iii. Refino: abrange processos de fundição, refino, comercialização etc.

Além disso, Lane (1964) afirma que a busca pelo teor de corte ótimo leva em consideração parâmetros econômicos, geológicos (distribuição do teor no depósito) e restrições de capacidades. Para assegurar a sua conclusão, Lane desenvolveu um algoritmo com 6 formulações de teores de corte para chegar no teor de corte ótimo, divididas em teores econômicos limitantes e teores de equilíbrio. Segundo Hall (2014), esses teores são reduzidos para 3 e apenas um deles será o teor de corte ótimo, ao longo do tempo os valores mudarão em virtude das condições geológicas e econômicas que não serão as mesmas.

Hall (2014) afirma que a Método de Lane apresenta uma certa complexibilidade na compreensão, visto que o estudo desenvolvido por Lane apresenta muitas derivações matemáticas de suas fórmulas, o que dificulta a aplicabilidade da metodologia pelos profissionais. Lane destaca que o valor das operações depende da reserva remanescente, do tempo e das estratégias, de forma que as melhores estratégias adotadas contribuirão para a maximização do valor, sendo essas estratégias correspondentes a definição de teores de corte, cavas finais, fases da lavra, taxas de mineração e tratamento e, sequenciamento de depósitos (HALL, 2014). Com isso, Hall (2014) divide o Método de Lane em duas partes, sendo o Lane Simples, que otimiza os teores de corte com base nas outras decisões estratégicas que são fixas, ou seja, a otimização do teor de corte considera taxas de produção fixas. Já a Lane Complexa abrange todas as opções estratégicas disponíveis como variáveis, não se limitando apenas à otimização do teor de corte.


Para obter uma melhor compreensão do Método de Lane, Lane (1964) sugere a compreensão dos conceitos abaixo para melhor entendimento da metodologia:

- i. Teor de corte ótimo – teor de corte que maximiza o VPL;
- ii. Política de corte – consiste em teores de cortes dinâmicos que permite a mudança de estratégia ao longo do tempo, buscando um VPL mais ótimo para cada ano da vida útil da mina;

- iii. Teor de corte de equilíbrio – teor de corte que garante que mais de um processo (lavra, processamento e refino) estejam operando na capacidade de forma harmônica. Sendo em função da geologia e das capacidades das usinas;
- iv. Custo de oportunidade – custo relacionado ao tempo de lavar e/ou processar material adicional de acordo com a capacidade máxima das operações. Sendo contabilizado no Método de Lane.

A seguir será descrito o Método de Lane, juntamente com os parâmetros que são considerados. Na Tabela 2 está a exemplificação desse modelo.

Tabela 2 – Modelo do Método de Lane

Operações	Material	Capacidade Máxima	Custos Unitários
	Minério e estéril	M	m
	Concentrado	C	c
	Produto	R	r
	-	-	-
	Custos Fixos		f
	Preço de Venda		s
	Recuperação		y

Fonte: Adaptada de Lane (1964)

Assim, Lane (1964, 1988) propõe os seguintes parâmetros:

M - Capacidade máxima de material lavado por período.

C - Capacidade máxima do concentrador por período.

R – Capacidade máxima de refino por período: pode ser uma restrição à produção da refinaria ou uma limitação de mercado.

m - Custos por unidade de material lavrado: para lavra a céu aberto os custos unitários de mineração incluem custos de mineração, como perfuração, detonação, carregamento, caminhão, amostragem de mina etc.

c - custos por unidade de minério processado: para lavra a céu aberto inclui custos de britagem, moagem, flotação, lixiviação, amostragem de controle etc. Também inclui custos de transporte se o minério for transportado a uma distância maior que a do estéril.

r - custos por unidade de minério refinado: incluem todos os custos incorridos nas etapas de produto e venda, como fundição, refino, embalagem, frete, seguro etc.

f - custos fixos por período: incluem todos os custos, tais como rendas, taxas, administração, manutenção de estradas e edifícios etc., que são independentes dos níveis de produção dentro dos limites normais de variação, mas que, no entanto, cessariam se a mina fosse encerrada por completo.

F – custo de oportunidade.

s - preço de venda por unidade de produto: todos os encargos de venda devem estar incluídos em r. Caso contrário, devem ser subtraídos de s.

y – recuperação.

g – teor de corte referente às 6 formulações do processo (teores limites e de equilíbrio).

G – teor de corte intermediário e ótimo.

2.3.4.1. Teores de Corte Limitantes

Nesta etapa serão definidos 3 teores de corte limitantes (*breakeven*) referente aos processos de lavra, processamento e refino. Quando uma das operações é considerada a restrição governante de capacidade, nos outros dois processos essa restrição é ignorada, mas essa irrealidade é resolvida quando se tem o teor de corte ótimo proveniente das 6 formulações (HALL, 2014). Com isso, a compreensão teórica das formulações matemáticas de Lane foi resultado dos estudos realizados por Hall (2014), que serão abordados abaixo.

2.3.4.1.1. Limite de Lavra

Neste caso a capacidade de lavra é a restrição governante. Para Hall (2014), o material desta etapa é referente ao minério e estéril lavrado, sendo, portanto, aplicado os custos variáveis de acordo com o destino do material. Assim, o autor afirma que alguns custos são excluídos do cálculo do limite de lavra, sendo eles:

- i. Custos comuns;
- ii. Custos variáveis totais: são considerados para todos os cálculos dos teores de cortes;
- iii. Custos fixos.

A tonelagem de rocha na lavra e a taxa máxima de lavra determinam o tempo necessário para a etapa, com custos fixos irrelevantes. Essa duração se torna fixa e não influencia no teor de corte, de modo que o custo de oportunidade não é incluído. As receitas do minério devem cobrir apenas os custos variáveis de tratamento e refino para alcançar o equilíbrio financeiro. Qualquer valor acima do ponto de equilíbrio contribuirá positivamente para o fluxo de caixa e para o VPL. Com isso, Lane (1964) determina o Limite de Mineração por meio da Equação 12.

$$g_m = \frac{c}{y(s - r)} \quad (12)$$

2.3.4.1.2. Limite de Concentração

A capacidade do concentrador é a restrição governante. Neste caso os custos variáveis de mineração não são levados em consideração, visto que o material de interesse é somente o minério. A quantidade de rocha classificada como minério e a taxa máxima de tratamento determinarão o tempo mínimo necessário para a etapa de mineração. Com isso, custos fixos se tornam relevantes para a decisão do teor de corte, pois são incluídos dependendo do tempo que leva para o material ser classificado como minério. Os custos fixos podem ser considerados custos marginais. Para gerar receita, a venda do minério deve cobrir:

- i. custos variáveis de tratamento e comercialização (como no caso limitado da mineração);
- ii. custos fixos incorridos durante o tempo necessário para tratar o minério;

- iii. o custo de oportunidade do valor do dinheiro no tempo de adiar o VPL do restante da operação pelo tempo necessário para lidar com a etapa de mineração em consideração.

Lane (1988) determina o Limite de Concentração por meio da Equação 13.

$$g_c = \frac{c + \frac{f + F}{C}}{y(s - r)} \quad (13)$$

2.3.4.1.3. Limite de Refino

A capacidade do refinador é a restrição governante, em que “a exaustão do avanço de lavra é a principal consequência da quantidade de minério recuperável e o volume máximo de produto produzido” (SOUZA, 2016). Hall (2014) afirma que os custos variáveis de mineração não devem ser considerados para a decisão de corte, mas os custos fixos são fundamentais. Além disso, o autor conclui que a quantidade de produto recuperável e a taxa de comercialização determinam o tempo mínimo necessário para a mineração, ou seja, se o teor de corte não classificar nenhum material minério, não iria gerar produto e a duração da mineração será zero, resultando em uma taxa de mineração infinita.

Assim, a venda do minério deve cobrir os seguintes custos.

- i. Custos variáveis de tratamento e comercialização;
- ii. Custos fixos incorridos durante a comercialização do produto recuperado;
- iii. Custo de oportunidade do valor do dinheiro em adiar o VPL do resto da operação.

Lane (1988) determina o Limite de Refino por meio da Equação 14:

$$g_r = \frac{c}{y(s - r - \left(\frac{f + F}{R}\right))} \quad (14)$$

2.3.4.2. Balanceamento dos Teores de corte

O balanceamento entre os teores ocorre quando dois processos de produção operam na capacidade. De acordo com Lane (1988), os processos de produção consistem em um sistema ao qual entram em equilíbrio, de modo que nenhum processo se torna o limitante. Assim, fatores

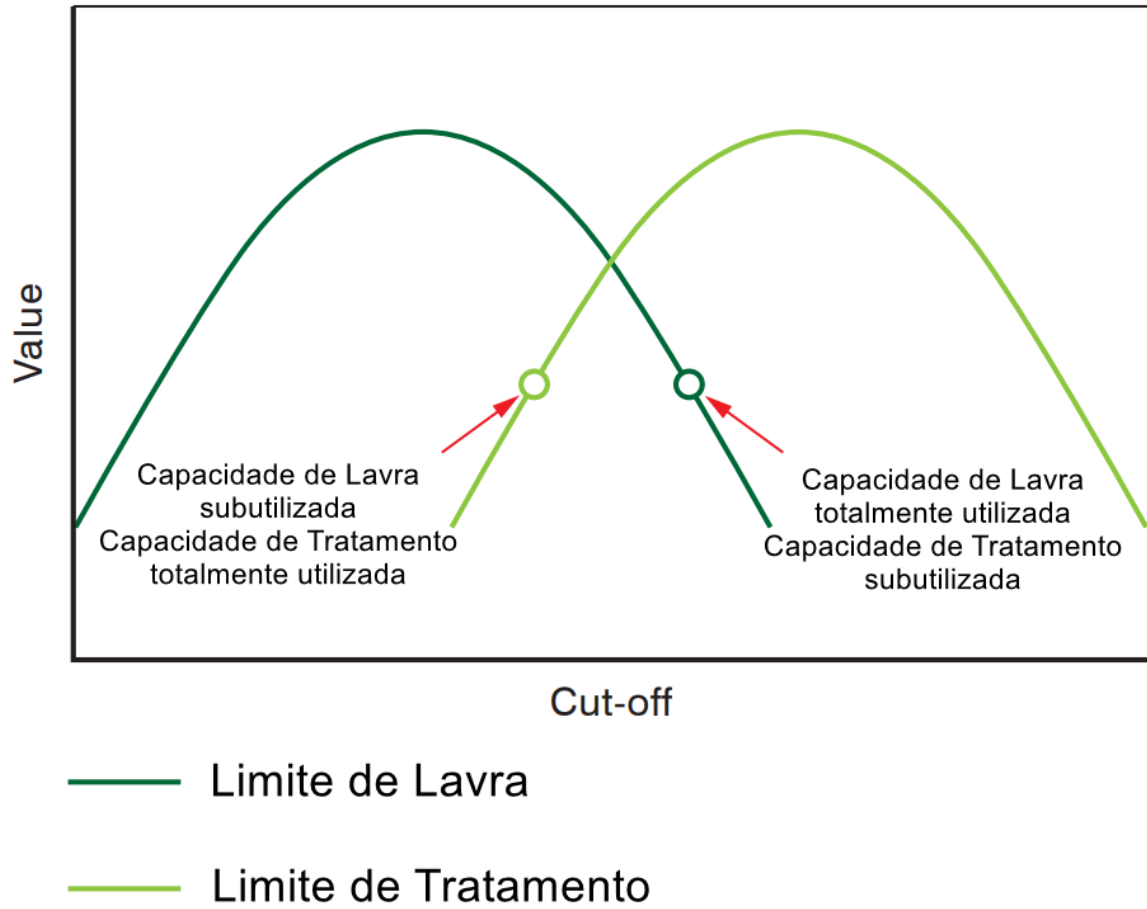
que determinam o uso das capacidades de cada processo estão relacionados a distribuição do teor de corte do material lavrado e o teor de corte aplicado a esse material lavrado.

Lane (1988) deduz implicações ao se variar o teor de corte, sendo que as capacidades do sistema estabelecem um controle para os possíveis teores de corte, contribuindo para a escolha eficaz do teor de corte ótimo. A seguir os efeitos na escolha dos teores de corte.

- i. Teores de corte menores implicam em uma quantidade alta de material considerado minério, com alta recuperação do metal, mas minério com teor médio baixo.
- ii. Teores de corte altos contribuem para a seletividade da lavra, implicando em uma movimentação maior da lavra para atender os níveis de minério, com baixa recuperação e teor médio alto do minério.
- iii. Teores de corte médios apresentam resultados medianos e podem ser utilizados para o equilíbrio de dois ou mais processos, sendo conhecidos como os teores de corte de balanceamento.

Todo material marginal não deve ser considerado minério se houver algum processo de produção com capacidade maior que o outro, visto que a redução do teor de corte para atender à demanda do estágio com maior capacidade faz com que o estágio com menor capacidade necessite aumentar sua produção para suprir o novo fluxo de material, o que raramente acontece (HALL, 2014 apud SOUZA, 2016). Por outro lado, Hall afirma que se o teor de corte escolhido for o teor limitante calculado para o estágio com menor capacidade, o estágio com maior capacidade será subutilizado devido ao fluxo de material resultante, como mostra a Figura 7.

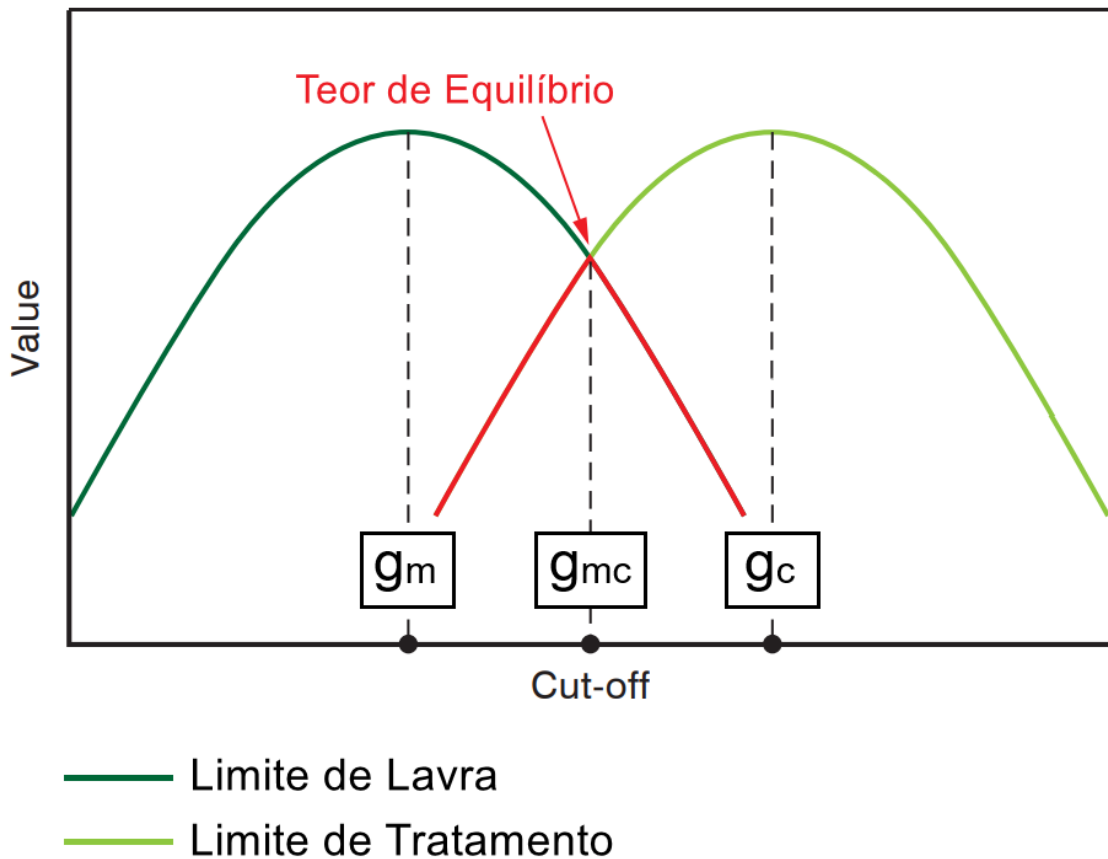
Figura 7 – Curvas de Valor *versus* Teor de Corte para os processos de Lavra e Tratamento



Fonte: Hall (2014)

Um exemplo do balanceamento entre dois estágios pode ser observado na Figura 8, na qual o ponto de equilíbrio corresponde ao momento em que os processos de lavra e tratamento operam em suas capacidades limitantes. Com isso, o teor do balanceamento é derivado apenas de parâmetros físicos, como capacidade, distribuição do valor e relação da curva tonelagem e teor, e teor de corte (HALL, 2014), além de que podem variar por meio de um corpo mineralizado irregular (LANE, 1964).

Figura 8 - Teor de Corte de Equilíbrio entre os processos de Lavra e Tratamento



Fonte: Hall (2014)

Os teores de corte de balanceamento são divididos em 3 etapas de acordo com Lane (1964), sendo eles:

g_{mc} – teor de corte do equilíbrio entre Lavra e Concentração;

g_{cr} – teor de corte do equilíbrio entre Concentração e Refino;

g_{mr} – teor de corte do equilíbrio entre Lavra e Refino.

2.3.4.2.1. Teor de Corte de Balanceamento Lavra-Concentração (g_{mc})

Os processos de Lavra e Concentração entrarão em equilíbrio quando atingirem suas capacidades. O balanceamento desses dois processos ocorre quando a relação entre o minério e

o material total se torna igual à relação entre a capacidade do concentrador (C) e capacidade de lavra (M).

$$\frac{\text{Minério}}{\text{Material total}} = \frac{C}{M} \quad (15)$$

Para facilitar a compreensão, será apresentada uma exemplificação:

$$C = 2 \text{ Mt/a}$$

$$M = 5 \text{ Mt/a}$$

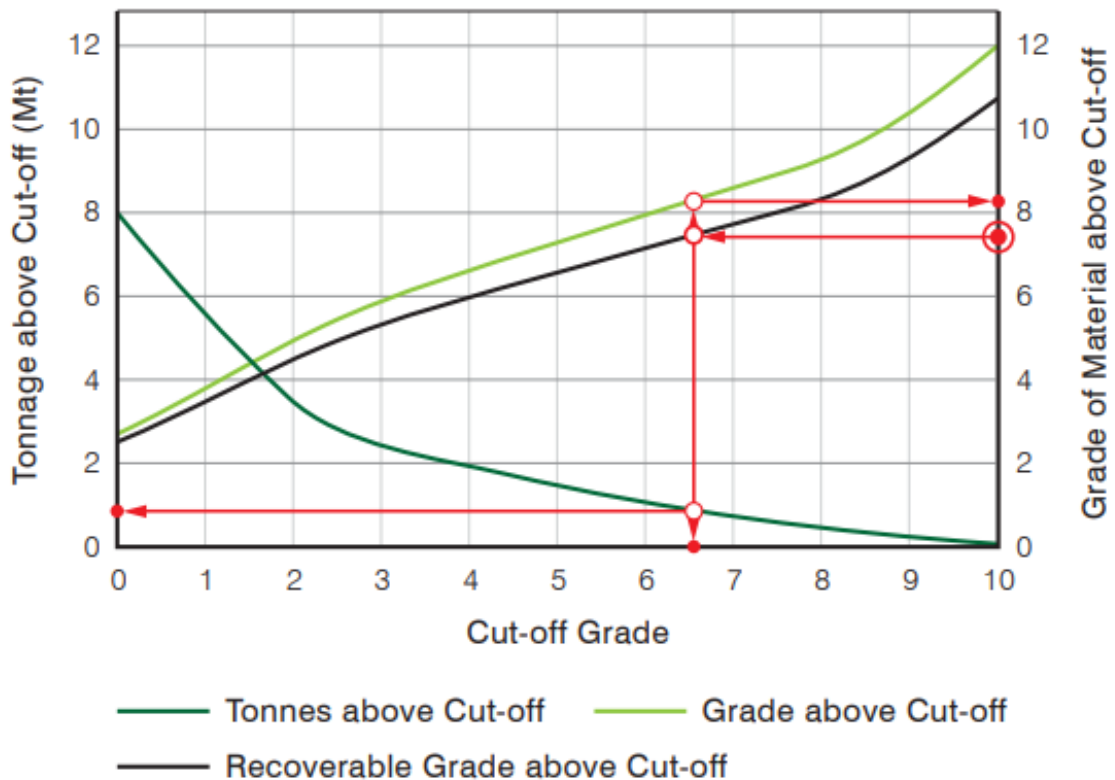
$$\frac{C}{M} = \frac{2}{5} = 0.4 = 40\% \quad (16)$$

Com a determinação das capacidades da lavra e tratamento, o teor de equilíbrio entre os dois processos será o teor correspondente a 40% do material total da reserva. Assim, levando em consideração uma curva de tonelagem-teor, como na Figura 9, os 40% de uma reserva estimada em 8Mt corresponde a um valor de 3,2Mt, que por vez terá um teor de corte de 2,3% e um teor médio do minério de aproximadamente 5,3%. Portanto, levando em consideração esse teor de corte e os limites de capacidade, tanto a tonelagem de minério (3,2 Mt) quanto a de rocha (8Mt) levarão 1,6 ano para serem tratadas. As mesmas durações são necessárias para ambas as etapas do processo e elas estão, de fato, em equilíbrio.

$$\frac{R}{C} = \frac{0.15}{2} = 0.075 = 7.5\% \quad (18)$$

Segundo a Figura 10, foi traçada uma curva referente ao teor recuperado em cima da curva de teor médio com base na recuperação metalúrgica de 90%. Assim, com as capacidades da concentração e refino, o teor de equilíbrio entre os dois processos será o teor recuperado que corresponde a 7.5%, em que esse teor equivale ao produto recuperado que será manuseado pelo circuito do produto e limitado por sua capacidade, não o produto contido no minério. Com isso, para atingir o teor recuperado de 7,5%, o teor de corte deverá ser de 6.7% com um teor médio de 8.3% e a tonelagem de minério correspondente 0.8M t.

Figura 10 - Exemplo de curva Teor-tonelagem que ilustra o teor de corte do balanceamento tratamento-refino



Fonte: Hall (2014)

2.3.4.2.3. Teor de Corte de Balanceamento Lavra-Refino (g_{mr})

O equilíbrio entre a Lavra e Refino ocorre quando a relação entre o produto recuperado e o material total lavrado é igual a relação entre a capacidade de refino (R) e a capacidade de lavra (M). Com o aumento do teor de corte, o minério tende a diminuir e consequentemente o

produto também, porém, o teor médio do produto no minério aumenta. Assim, nesta etapa, para se obter o equilíbrio, é necessário ter o teor de rocha recuperada usando o produto, de forma que a tonelagem da rocha permanece constante e teor da rocha recuperada diminui com o aumento do teor de corte.

$$\frac{\textit{Produto}}{\textit{Material total}} = \frac{R}{M} \quad (19)$$

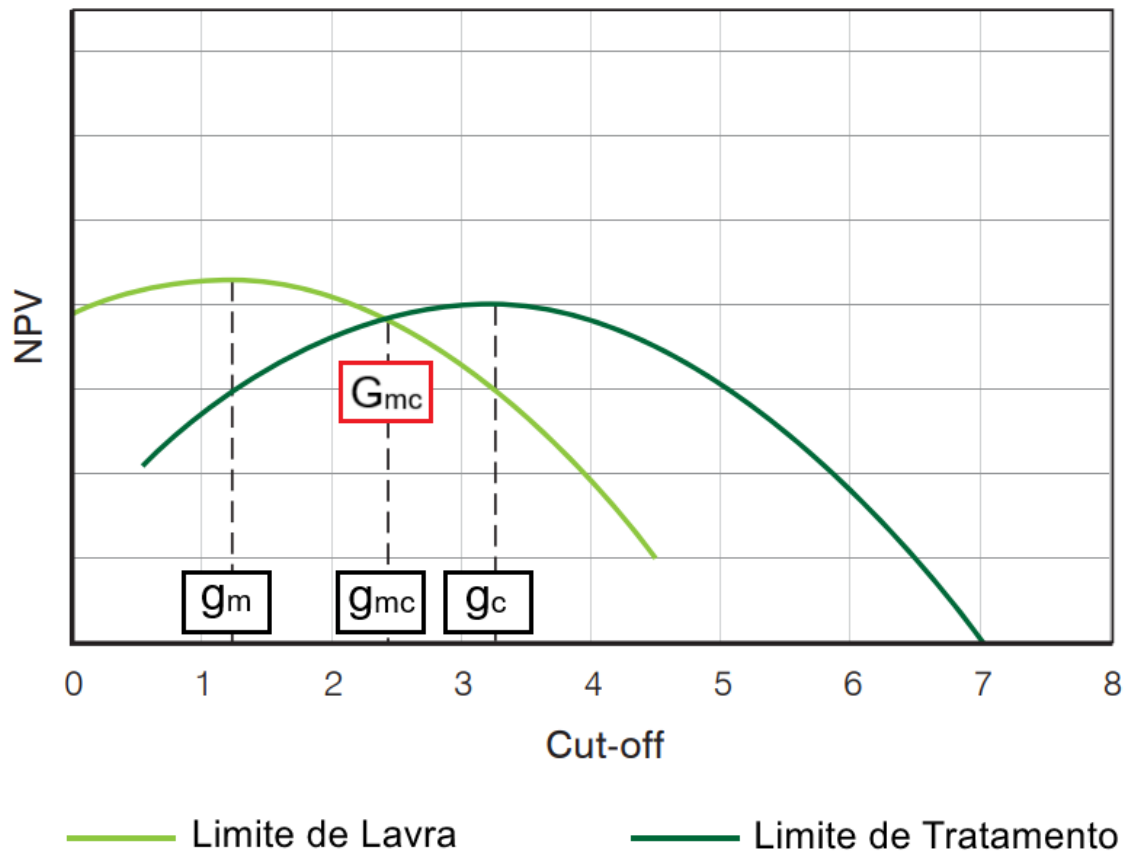
2.3.4.3. Teor de Corte Ótimo

A partir dos teores de corte econômicos e de equilíbrio definidos por Lane, para a definição do teor de corte ótimo o método propõe reduzir esses 6 teores em 3 teores de corte intermediários das combinações entre os estágios, considerado por Hall (2014) como o valor intermediário dos teores de corte limitantes e do teor de corte de equilíbrio. O teor de corte ótimo será o maior valor intermediário dos 3 teores de corte intermediários (HALL, 2014).

- i. Lavra e Concentração: G_{mc} = valor intermediário entre g_m , g_c e g_{mc} ;
- ii. Concentração e Refino: G_{cr} = valor intermediário entre g_c , g_r e g_{cr} ;
- iii. Lavra e Refino: G_{mr} = valor intermediário entre g_m , g_r e g_{mr} ;
- iv. Lavra-Concentração-Refino: G_{mcr} = valor intermediário entre G_{mc} , G_{cr} e G_{mr} .

A seguir, será demonstrado graficamente a definição dos teores de corte intermediários dos processos de lavra, concentração e refino. A Figura 11 demonstra o gráfico dos teores de corte dos processos lavra-concentração em relação ao VPL, onde a interseção entre as duas curvas representa o teor de equilíbrio em que os estágios operam na sua capacidade máxima. Caso o valor seja maior que o valor da operação lavra-concentração é possível concluir que um dos processos está operando acima da sua capacidade. Assim, o valor máximo condiz com o ponto do teor de equilíbrio, sendo o teor de corte intermediário (G_{mc}).

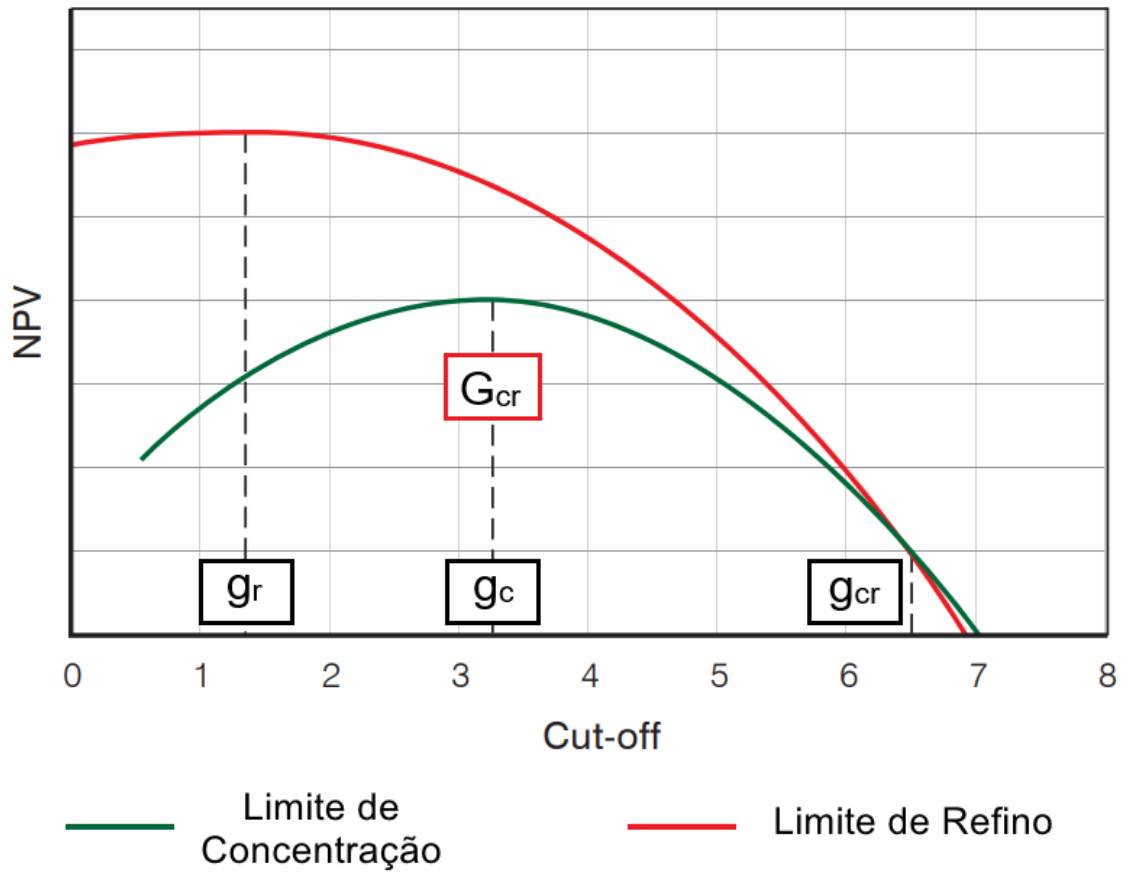
Figura 11 – Exemplo Teor de Corte Intermediário entre Lavra-Concentração



Fonte: Hall (2014)

Nos estágios Concentração-refino, a Figura 12 mostra a possibilidade de ocorrência do teor de equilíbrio ser maior entre os teores limitantes. Assim, o valor máximo é atingido quando se tem o valor intermediário entre os 3 teores de corte, portanto, o teor de corte intermediário (G_{cr}) corresponde ao teor de corte limitante da concentração (g_c).

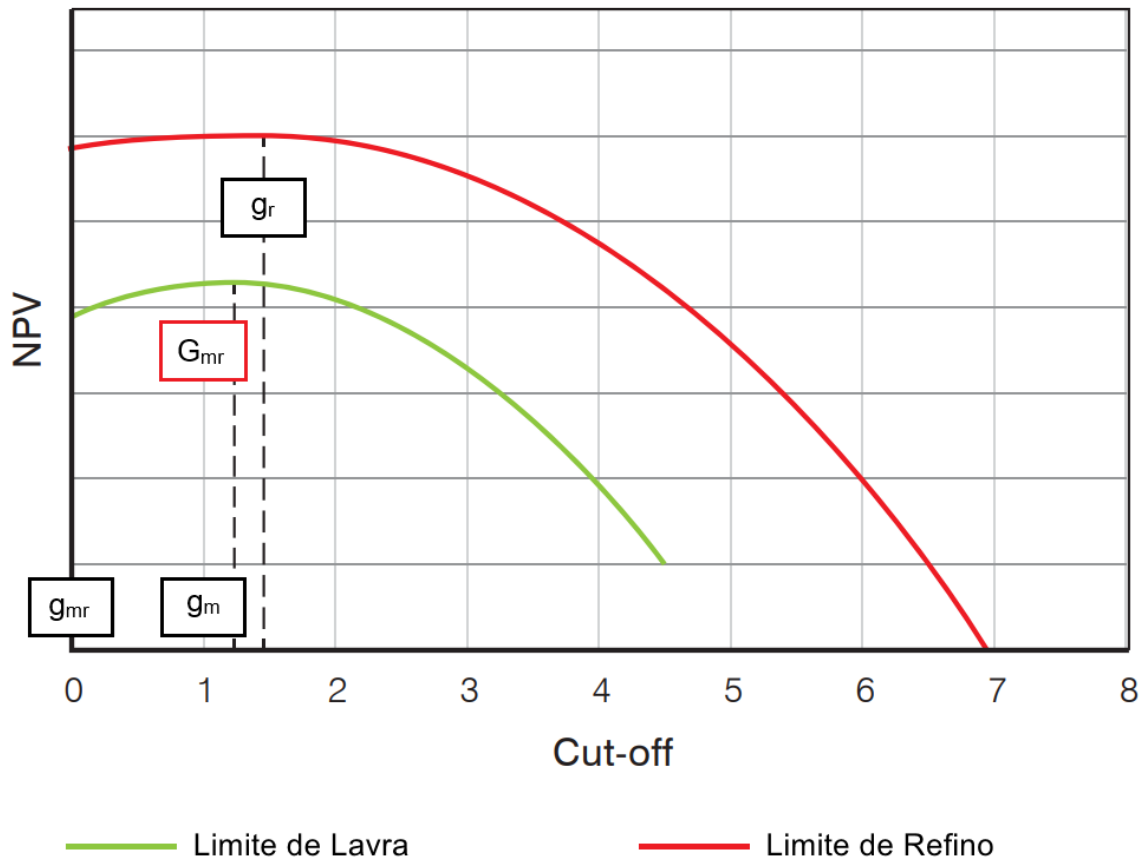
Figura 12 – Exemplo Teor de Corte Intermediário entre Concentração-Refino



Fonte: Hall (2014)

Para os processos de produção Lavra-Refino, a Figura 13 mostra que o equilíbrio das duas etapas não ocorre, mesmo que o teor de corte seja diminuído para zero no processo de lavra, o material para alimentar a capacidade do outro estágio é insuficiente, portanto, a lavra é acatada como a restrição do processo de rendimento. Dessa maneira, o teor de corte de equilíbrio é considerado zero e por meio das relações geométricas, o teor de corte intermediário será o valor médio entre os teores limitantes e de equilíbrio, sendo então o g_m .

Figura 13 – Exemplo Teor de Corte Intermediário entre Lavra-Refino



Fonte: Hall (2014)

Assim, Lane (1964;1988) determina os teores de corte intermediários da seguinte forma.

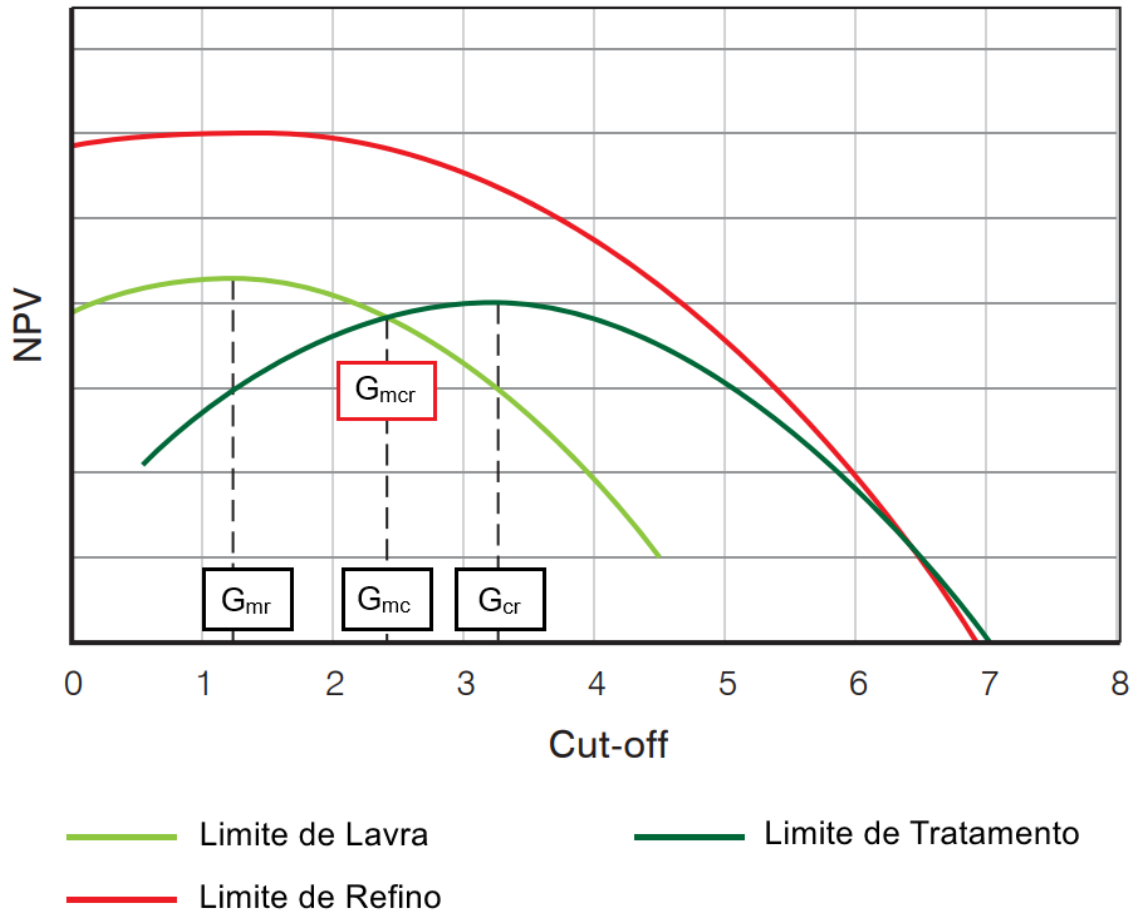
$$G_{mc} \begin{cases} g_m, & \text{se } g_{mc} \leq g_m \\ g_c, & \text{se } g_{mc} \geq g_c \\ g_{mc}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$G_{cr} \begin{cases} g_r, & \text{se } g_{cr} \leq g_r \\ g_c, & \text{se } g_{cr} \geq g_c \\ g_{cr}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$G_{mr} \begin{cases} g_m, & \text{se } g_{mr} \leq g_m \\ g_r, & \text{se } g_{mr} \geq g_r \\ g_{mr}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A determinação do teor de corte ótimo é mostrada na Figura 14, sendo definido pelo ponto intermediário dentre os três teores de corte intermediários. De acordo com a imagem, as curvas representam o valor máximo que pode ser gerado quando os estágios atuam de forma individual no processo de restrição do valor. Assim, o teor de corte ótimo (G_{mcr}) é o G_{mc} .

Figura 14 – Exemplo Teor de Corte Ótimo entre Lavra, Concentração e Refino



Fonte: Hall (2014)

3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada no trabalho consiste em um estudo e análise estratégica no planejamento de mina, ao qual utilizará uma base de dados referente a um depósito poli metálico com o objetivo de maximizar o VPL variando diferentes estratégias de teores de corte. No trabalho, serão apresentados três cenários para comparação, que estão descritos abaixo.

- i. Cenário 1 – Sequenciamento Tradicional: maximizar VPL considerando o teor de corte *breakeven*;
- ii. Cenário 2 – Teor de corte dinâmico: maximizar VPL considerando teor de corte *breakeven* com possibilidade de esterilização de minério;
- iii. Cenário 3 – Otimização do teor de corte com pilha de estoque: maximizar VPL considerando teor de corte *breakeven* e pilha de estoque.

Tabela 3 - Etapas do projeto

Etapa 1	Determinação dos parâmetros financeiros e metalúrgicos
Etapa 2	Criação dos campos financeiros do modelo e criação do campo material
Etapa 3	Otimização de cava (<i>Pseudoflow</i>) e Sequenciamento Direto dos Blocos
Etapa 4	Criar cenários de maximização do VPL

O banco de dados a ser utilizado no estudo é um modelo de blocos que representa um depósito poli metálico com predominância de Cobre (Cu) e Ouro (Au) e vestígios de Prata (Ag) e Molibdênio (Mo), ao qual será utilizado o método de Lavra a Céu Aberto (Open Pit). Na Tabela 4, estão as informações do modelo de blocos.

Tabela 4 - Informações Modelo de Blocos

Depósito Poli metálico (Cu, Au, Ag e Mo)			
Material	Massa (t)	Volume (m³)	Densidade (t/m³)
Sulfetado/Fresco	6.945.669.577	3.307.499.946	2,10
Transição	28.580.975	12.150.787	2,35
Oxido	163.597.968	74.904.023	2,18
TOTAL	7.137.848.521	3.394.554.756	2,10

Na Tabela 5, estão as informações espaciais do modelo de blocos.

Tabela 5 - Informações espaciais do Modelo de Blocos

Tipo	X	Y	Z
Origem do Modelo	444.450	492.500	1.810
Tamanho das Células Pai (m)	15	15	15
Número de Células	110	147	94
Extensão do Modelo (m)	1.650	2.205	1.410

Nas Figuras 15 e 16 estão as representações do modelo de blocos em vista 3D e de Seção com aplicação de legenda sobre o tipo de material.

Figura 15 - Vista 3D do Modelo de Blocos

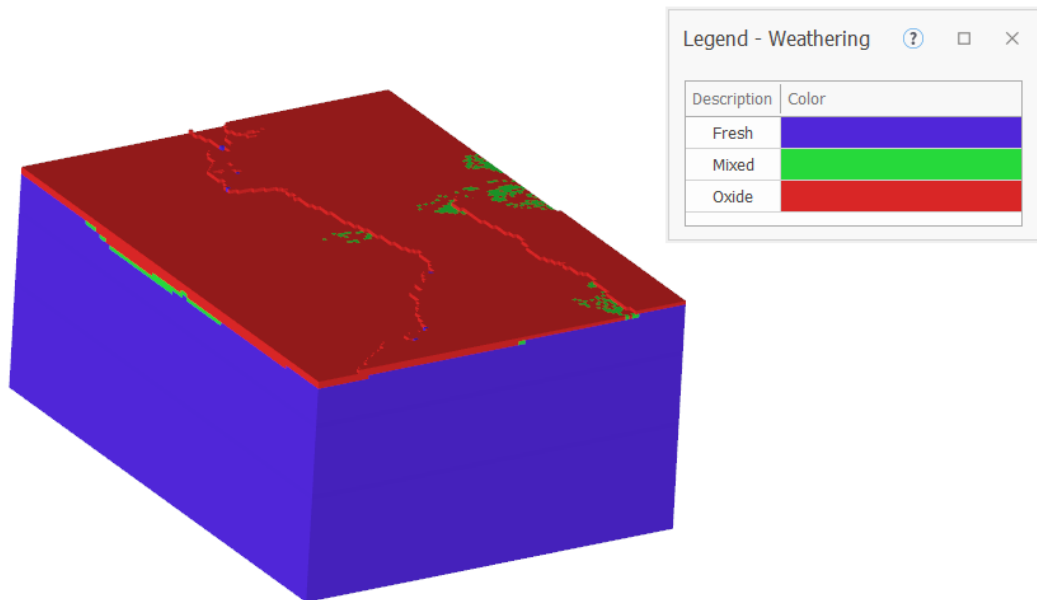
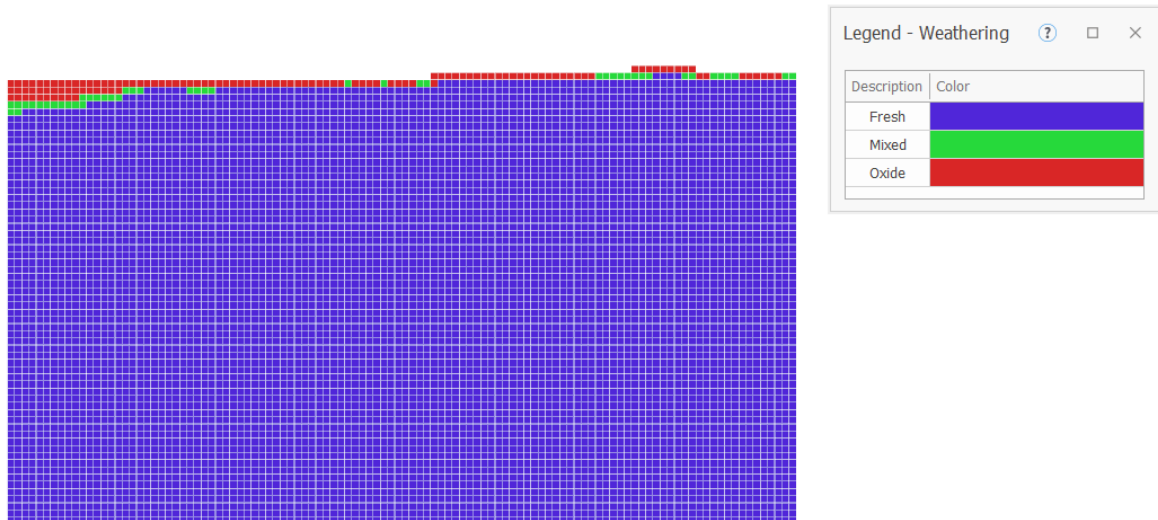


Figura 16 - Vista em Seção do Modelo de Blocos



3.1. PARÂMETROS FINANCEIROS E METALÚRGICOS

Na Tabela 6 estão os parâmetros financeiros e metalúrgicos que foram definidos e utilizados para a determinação do teor de corte, custos e receitas. Além disso, esses parâmetros foram baseados na realidade do mercado de mineração para as commodities que compõe o modelo de blocos a ser utilizado (Cu, Au, Ag e Mo).

Tabela 6 - Parâmetros Financeiros e Metalúrgicos

Nome	Descrição	Valor
Logística		
L_TRUCKCOST	Custo de Transporte para o Porto (USD/Tonelada de Concentrado)	60
L_SHIPCOST	Custo de Porto + Transporte Marítimo (USD/Tonelada de Concentrado)	80
L_CONCMOIST	Umidade do Concentrado (5%)	0,05
L_CONCLOSS	Perda de Concentrado na Logística (2%)	0,02
Lavra		
M_MINREC	Recuperação do minério (95%)	0,95
M_MINDIL	Diluição (5%)	0,05
M_WSTCOST	Custo de lavra (USD/Tonelada lavrada)	3
M_OREINCR OST	Custo incremental do minério (USD/Tonelada lavrada)	1
Payable		
CUPAY	Payable do Cobre (95%)	0,95
AUPAY	Payable do Ouro (90%)	0,90
AGPAY	Payable da Prata (90%)	0,90

MOPAY	<i>Payable</i> do Molibdênio (20%)	0,20
Penalidades		
PEN_THRESHOLD	Limite Penalidade Arsênio (0.20%)	0,002
PEN_VALUE	Valor Penalidade Arsênio (10 USD/Tonelada Seca de Concentrado acima do Limite)	10
PEN_INCREMENT	Incremento Penalidade Arsênio (0.10%)	0,001
Preço de Venda		
CUPRICE	Preço do Cobre (USD/lb)	3,50
AUPRICE	Preço do Ouro (USD/oz)	2000
AGPRICE	Preço da Prata (USD/oz)	20
MOPRICE	Preço do Molibdênio (USD/lb)	15
Processamento		
P_MILLCOST	Custo de Moagem e Flotação (USD/Tonelada processada)	8
P_GNA	Custos Administrativos (G&A) (USD/Tonelada processada)	2
P_CUREC	Recuperação Metalúrgica do Cobre (90%)	0,9
P_AUREC	Recuperação Metalúrgica do Ouro (50%)	0,5
P_AGREC	Recuperação Metalúrgica da Prata (40%)	0,4
P_MOREC	Recuperação Metalúrgica do Molibdênio (30%)	0,3
P_SREC	Recuperação Metalúrgica do Enxofre (30%)	0,3
P_ASREC	Recuperação Metalúrgica do Arsênio (70%)	0,7
P_CONCCU	Teor alvo do Concentrado de Cobre (28%)	0,28
Royalty		
ROYCFEM	2.0% sobre Receita Bruta	0,02
TCRC		
T_CUTC	Taxa de Tratamento do Concentrado de Cobre (USD/Tonelada seca Concentrado)	90
R_CURC	Taxa de Refinaria do Cobre (USD/lb <i>Payable</i> Cu)	0,08
R_AURC	Taxa de Refinaria do Ouro (USD/oz <i>Payable</i> Au)	5
R_AGRC	Taxa de Refinaria da Prata (USD/oz <i>Payable</i> Ag)	0,5
R_MORC	Taxa de Refinaria do Molibdênio (USD/lb <i>Payable</i> Mo)	0,03
Unidades		
OZGRAM	Unidade de Conversão (1 onça troy = 31,1035 gramas)	31,1035
LBGRAM	Unidade de Conversão (1 libra= 453,59 gramas)	453,592

3.2. CAMPOS FINANCEIROS DO MODELO DE BLOCOS E CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL

O cálculo do teor de corte foi baseado no NSR por se tratar de um depósito poli metálico, assim o teor de corte (*breakeven*) foi calculado em 10,97 USD/t. Então blocos sulfetados e com NSR > 10,97 USD/t foram classificados como minério, enquanto os outros blocos foram classificados como estéril. O NSR dos blocos foi calculado pela Equação 17, a qual leva em consideração apenas os custos de transporte e refinaria.

$$\begin{aligned}
 NSR = & Cu_{REV} + Au_{REV} + Ag_{REV} + Mo_{REV} - TRUCKING - SHIPPING \\
 & - Cu_{TC} - Cu_{RC} - Au_{RC} - Ag_{RC} - Mo_{RC} - ASPEN \\
 & - ROYALTY
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Onde,

Cu_{REV} – Receita do Cobre (Cu);

Au_{REV} – Receita do Ouro (Au);

Ag_{REV} – Receita do Prata (Ag);

Mo_{REV} – Receita do Molebidenio (Mo);

TRUCKING – Custo de transporte terrestre;

SHIPPING – Custo de transporte marítimo;

Cu_{TC} – Taxa de Tratamento do Cobre na Refinaria;

Cu_{RC} – Taxa de Refino do Cobre na Refinaria;

Au_{RC} – Taxa de Refino do Ouro na Refinaria;

Ag_{RC} – Taxa de Refino do Prata na Refinaria;

Mo_{RC} – Taxa de Refino do Molibdênio na Refinaria;

$ASPEN$ – Penalidade do Arsênio;

ROYALTY – CFEM.

As receitas e custos para o cálculo do NSR podem ser definidas pelas equações abaixo.

$$\begin{aligned}
 Cu_{REV} = & \frac{Cu(\%)}{100} * M_{MINREC} * P_{CUREC} * (1 - L_{CONLOSS}) * CU_{PAY} * \frac{100000}{LB_{GRAM}} \\
 & * CU_{PRICE}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

$$Au_{REV} = \frac{Au(\frac{g}{t})}{OZ_{GRAM}} * M_{MINREC} * P_{AUREC} * (1 - L_{CONLOSS}) * AU_{PAY} * AU_{PRICE} \quad (22)$$

$$Ag_{REV} = \frac{Ag(\frac{g}{t})}{OZ_{GRAM}} * M_{MINREC} * P_{AGREC} * (1 - L_{CONLOSS}) * AG_{PAY} * AG_{PRICE} \quad (23)$$

$$MO_{REV} = \frac{Mo(ppm)}{LB_{GRAM}} * M_{MINREC} * P_{MOREC} * (1 - L_{CONLOSS}) * MO_{PAY} * MO_{PRICE} \quad (24)$$

$$TRUCKING = \frac{Cu(\%)}{100} * M_{MINREC} * \frac{P_{CUREC}}{P_{CONCCU}} * (1 + L_{CONCMOIST}) * L_{TRUCKCOST} \quad (25)$$

$$SHIPPING = \frac{Cu(\%)}{100} * M_{MINREC} * \frac{P_{CUREC}}{P_{CONCCU}} * (1 + L_{CONCMOIST}) * L_{SHIPCOST} \quad (26)$$

$$CU_{TC} = \frac{Cu(\%)}{100} * M_{MINREC} * \frac{P_{CUREC}}{P_{CONCCU}} * T_{CUTC} \quad (27)$$

$$Cu_{RC} = \frac{Cu(\%)}{100} * M_{MINREC} * P_{CUREC} * (1 - L_{CONLOSS}) * CU_{PAY} * \frac{100000}{LB_{GRAM}} * R_{CURC} \quad (28)$$

$$Au_{RC} = \frac{Au(\frac{g}{t})}{OZ_{GRAM}} * M_{MINREC} * P_{AUREC} * (1 - L_{CONLOSS}) * AU_{PAY} * R_{AURC} \quad (29)$$

$$Ag_{RC} = \frac{Ag(\frac{g}{t})}{OZ_{GRAM}} * M_{MINREC} * P_{AGREC} * (1 - L_{CONLOSS}) * AG_{PAY} * R_{AGRC} \quad (30)$$

$$MO_{RC} = \frac{Mo(ppm)}{LB_{GRAM}} * M_{MINREC} * P_{MOREC} * (1 - L_{CONLOSS}) * MO_{PAY} * P_{MORC} \quad (31)$$

$$CONC_{AS} = \frac{As}{1000000} * P_{ASREC} * \frac{P_{MOREC}}{\frac{Cu}{100} * \frac{P_{CUREC}}{P_{CONCCU}}} * 100 \quad (32)$$

$$AS_{PEN} = \frac{\frac{CONC_{AS}}{100} - PEN_{THRESHOLD}}{PEN_{INCREMENT} * PEN_{VALUE}} * \frac{Cu}{100} * M_{MINREC} * \frac{P_{CUREC}}{P_{CONCCU}} \quad (33)$$

$$ROYALTY = (CU_{REV} + AU_{REV} + AG_{REV} + MO_{REV}) * ROYCFEM \quad (34)$$

Onde,

Cu – Teor de cobre (%);

Au – Teor de ouro (g/t);

Ag – Teor de prata (g/t);

Mo – Teor de molibdênio (ppm);

As – Teor de arsênio (ppm);

CONC_{AS} – Teor de arsênio no concentrado.

Para obter os resultados da otimização de cava foram calculados a receita e os custos para os materiais. A receita dos blocos foi aplicada apenas para material considerado Minério, sendo calculada pela Equação 35.

$$Receita = NSR * Tonelagem \quad (35)$$

Já os custos foram calculados para blocos de minério e estéril por meio das Equações 36 e 37.

$$Custos_{MIN} = Tonelagem * (M_{WSTCOST} + M_{OREINCR COST} + P_{MILLCOST} + P_{GNA}) \quad (36)$$

$$Custos_{EST} = Tonelagem * M_{WSTCOST} \quad (37)$$

3.3. OTIMIZAÇÃO DE CAVA (*PSEUDOFLOW*) E SEQUENCIAMENTO DIRETO DOS BLOCOS

Para a criação dos cenários, realizou-se uma otimização de cava com a utilização do algoritmo do *Pseudoflow*, o qual traz um resultado similar ao Lerchs-Grossmann, mas com um melhor tempo de processamento. Com isso, para a criação da otimização de cava, os campos financeiros considerados do modelo foram referentes à Receita e ao Custo dos blocos. Diante disso, como resultados da otimização, foram definidas cinco fases para o projeto, as quais podem ser visualizadas nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Vista de Topo das Fases

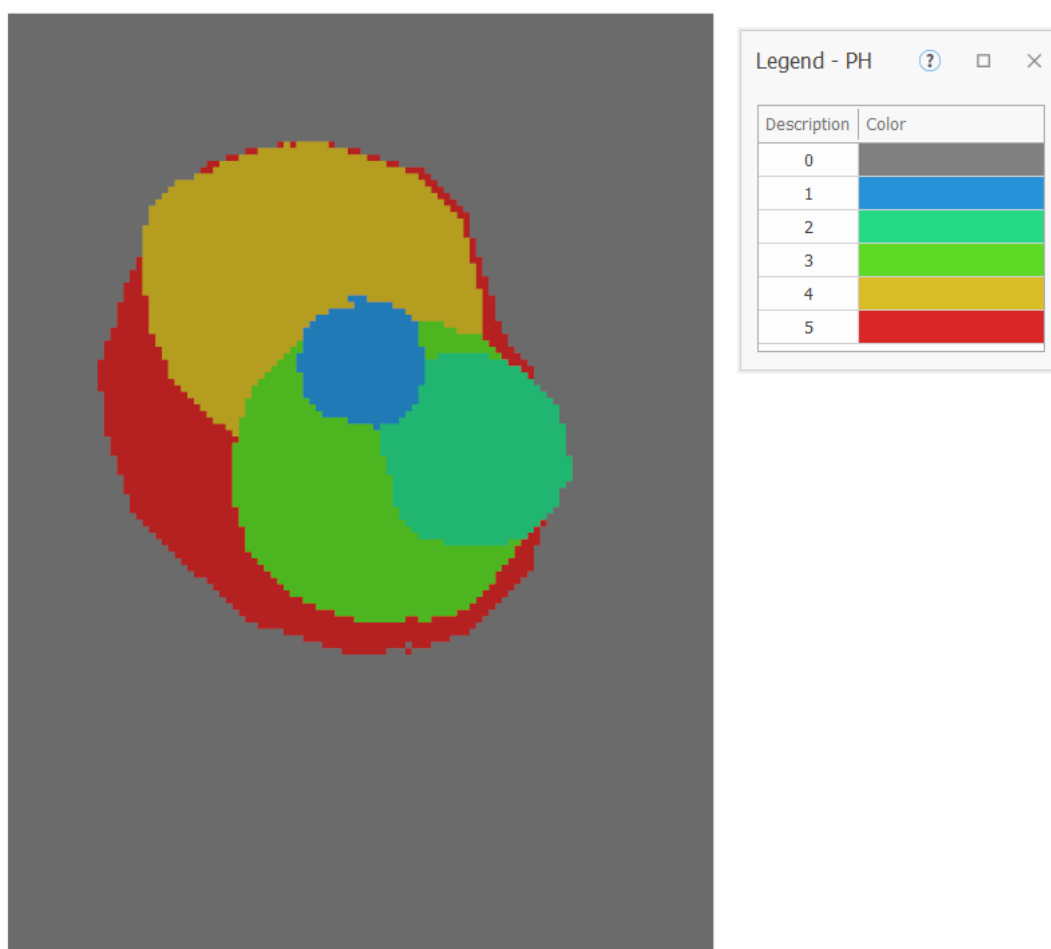
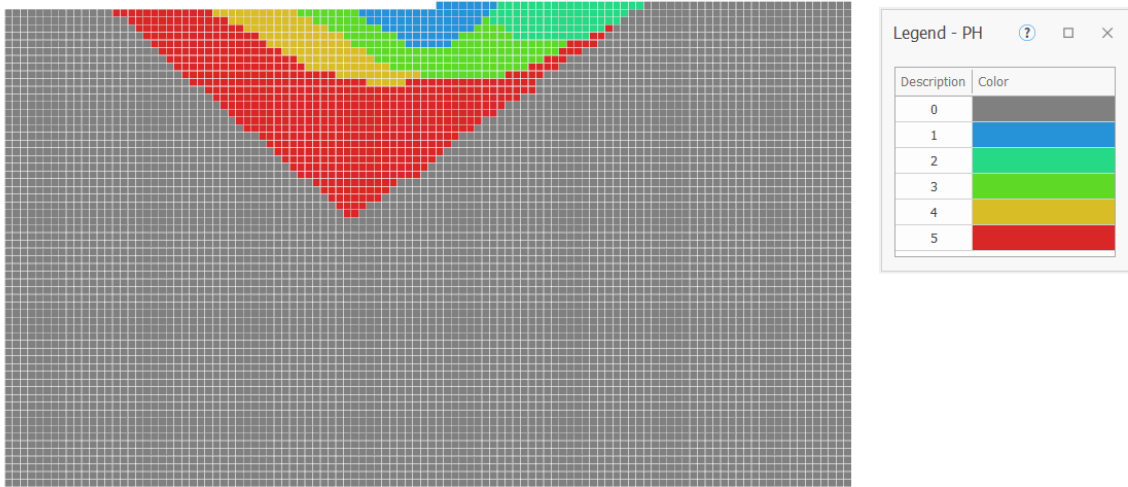


Figura 18 - Vista em Seção das Fases



Nas Figuras 19, 18 e 20 está a extensão do corpo de minério definido pelo NSR.

Figura 19 – Vista 3D - Corpo de minério

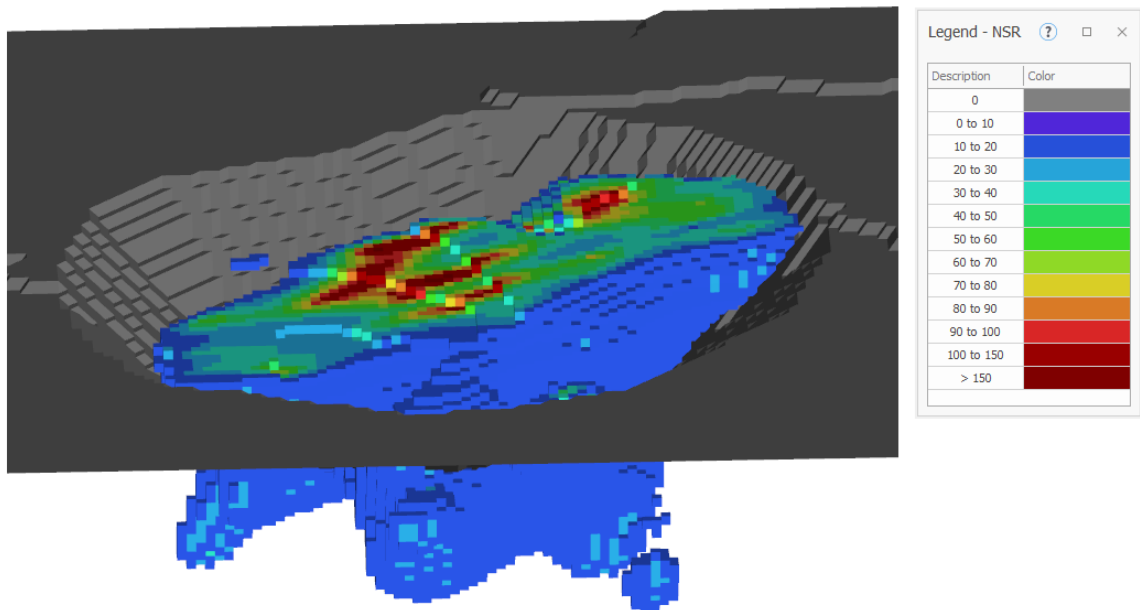
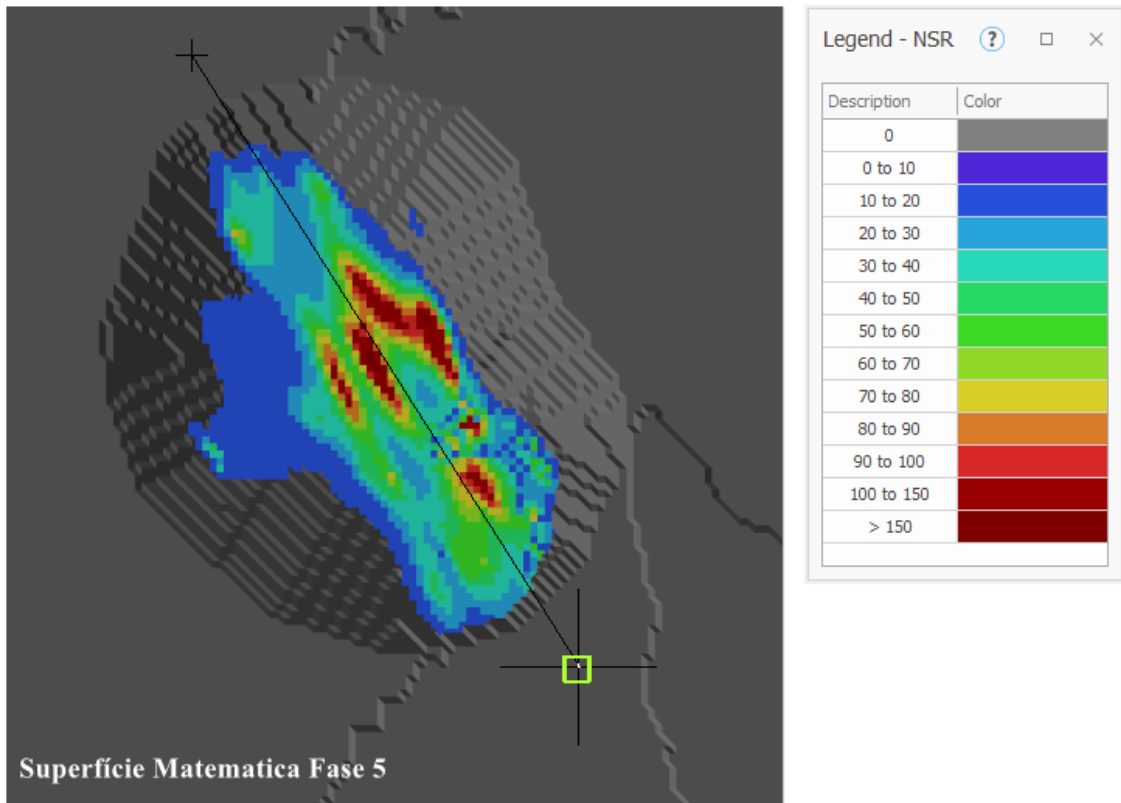


Figura 20 - Vista Seção Longitudinal - Corpo de minério

Vista de Topo



Vista de Seção

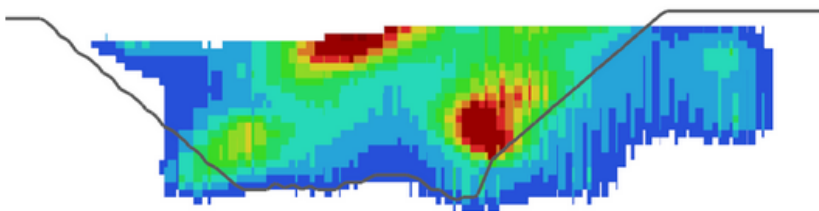
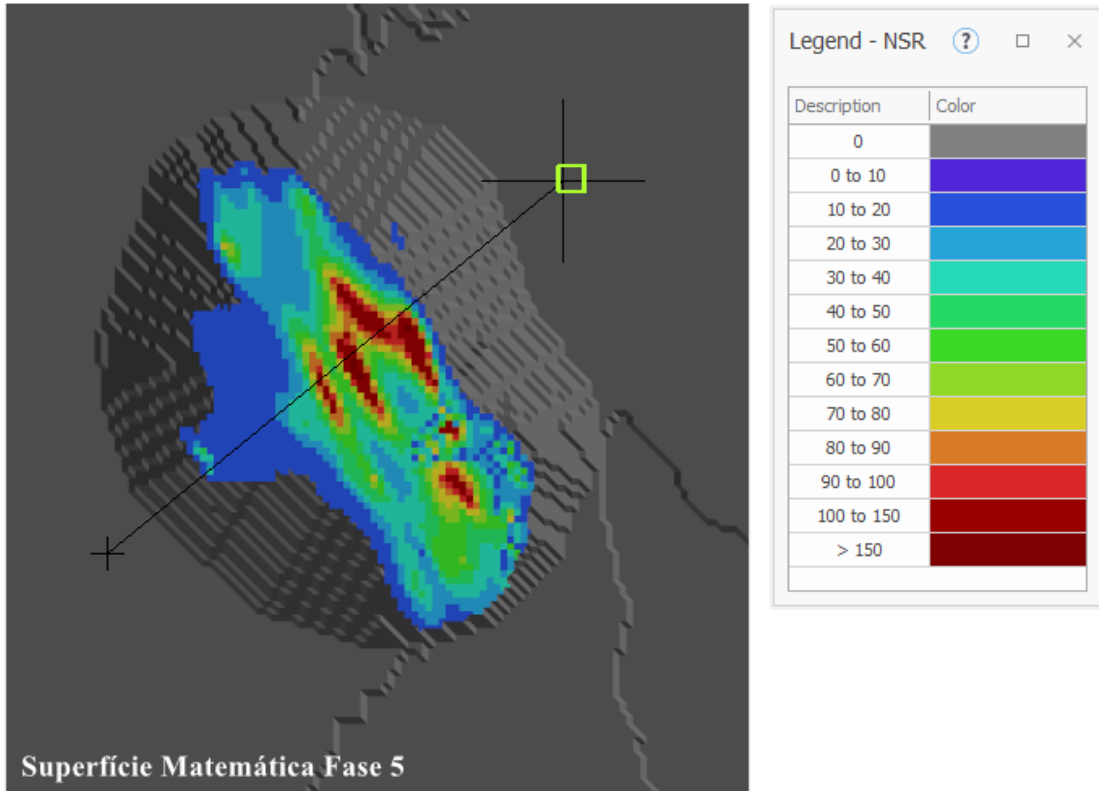
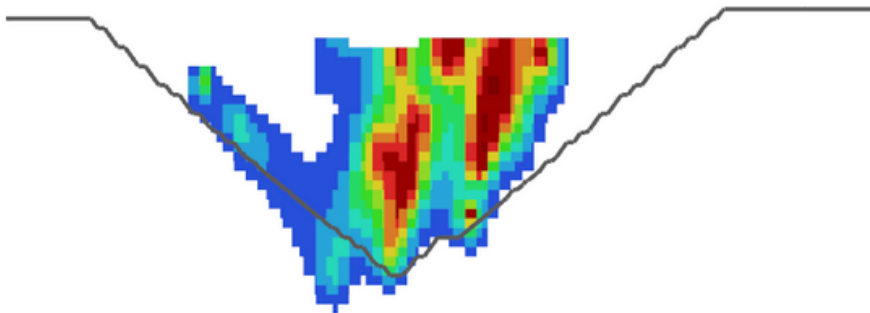


Figura 21 - Vista Seção Transversal - Corpo de minério

Vista de Topo



Vista de Seção



As Tabelas 7 e 8 apresentam uma cubagem das fases do projeto para demonstrar a distribuição do material e o teor médio.

Tabela 7 - Cubagem das Fases - Minério

Fases	Minério			
	Massa (Mt)	Volume (Mm ³)	Densidade (g/cm ³)	NSR (USD/t)
1	3,5	1,1	3,05	91,54

2	8,5	3,2	2,67	75,56
3	75,2	24,6	3,06	54,41
4	57,8	18,7	3,09	39,80
5	95,3	31,3	3,04	38,29
TOTAL	240,3	78,9	3,04	45,79

Tabela 8 - Cubagem das Fases - Estéril

Fases	Estéril			
	Massa (t)	Volume (m ³)	Densidade (g/cm ³)	NSR (USD/t)
1	5,4	2,3	2,34	12,33
2	17,8	8,5	2,09	4,14
3	22,5	9,2	2,45	15,44
4	64,6	25,9	2,49	10,59
5	74,5	29,9	2,50	3,72
TOTAL	184,7	75,8	2,44	9,44

Por meio da otimização de cava, foram criados os cenários que serão descritos no item 3.4 utilizando o *Deswik.GO*, software desenvolvido pela *Deswik* em parceria com a *Alicanto Labs da Universidade Adolfo Ibañez*. O *Deswik.GO* foi desenvolvido para ser utilizado no sequenciamento estratégico de lavra, ao qual traz soluções para problemas complexos que inclui a funcionalidade de otimização multi mina, utilizando o sequenciamento direto de blocos e a geração de fases através do método de agrupamento difuso. Também é possível realizar a otimização de sequenciamentos e destinos e fazer análises econômicas usando os relatórios integrados. O *Deswik.GO* maximiza o Valor Presente Líquido, utilizando programação linear inteira mista, para encontrar a solução ótima considerando as restrições operacionais, de processamento e de capital aplicadas. Isto contribui para o melhor entendimento das opções e tomada de decisões mais assertivas sobre o que lavar, quando lavar, como tratar blocos da cava até as pilhas de estéril ou produto, e como empregar da melhor forma o capital no plano de lavra, por exemplo, como cavas novas ou incremento de capacidade. (DESWIK, 2023).

3.4. CENÁRIOS PARA MAXIMIZAÇÃO DO VPL

O projeto consistiu em executar cenários para comparação no ponto de vista de maximização do VPL, além de indicadores, consequências importantes, como vida útil da mina, *payback* e TIR. Com a definição do NSR dos blocos, do teor de corte de 10.97 USD/t e da classificação do material, outros parâmetros financeiros, como custo de lavra e processamento, foram considerados para a execução dos cenários no *Deswik.GO*, como mostra a Tabela 9.

Além disso, foram determinados para os cenários um período limite de sequenciamento de 30 anos com um potencial reserva mineral de 240,3 milhões de toneladas de minério e 184,7 milhões de toneladas de estéril, e uma premissa de que o número máximo de bancadas que podem ser lavradas por período do sequenciamento é 4 (*Sink Rate*), como apresenta a Figura 22.

Tabela 9 - Parâmetros financeiros

Input Data	Valor	Unidade
Custo de Mina – Estéril	3,00	US\$/t lavrada
Custo de Mina – Minério	4,00	US\$/t lavrada
Custo de Retomada – Pilha Estoque	1,00	US\$/t retomada
Custo de Processamento	10,00	US\$/t processada
Taxa de Desconto	10,00	%/ano
CAPEX Inicial	1.500	US\$ milhão

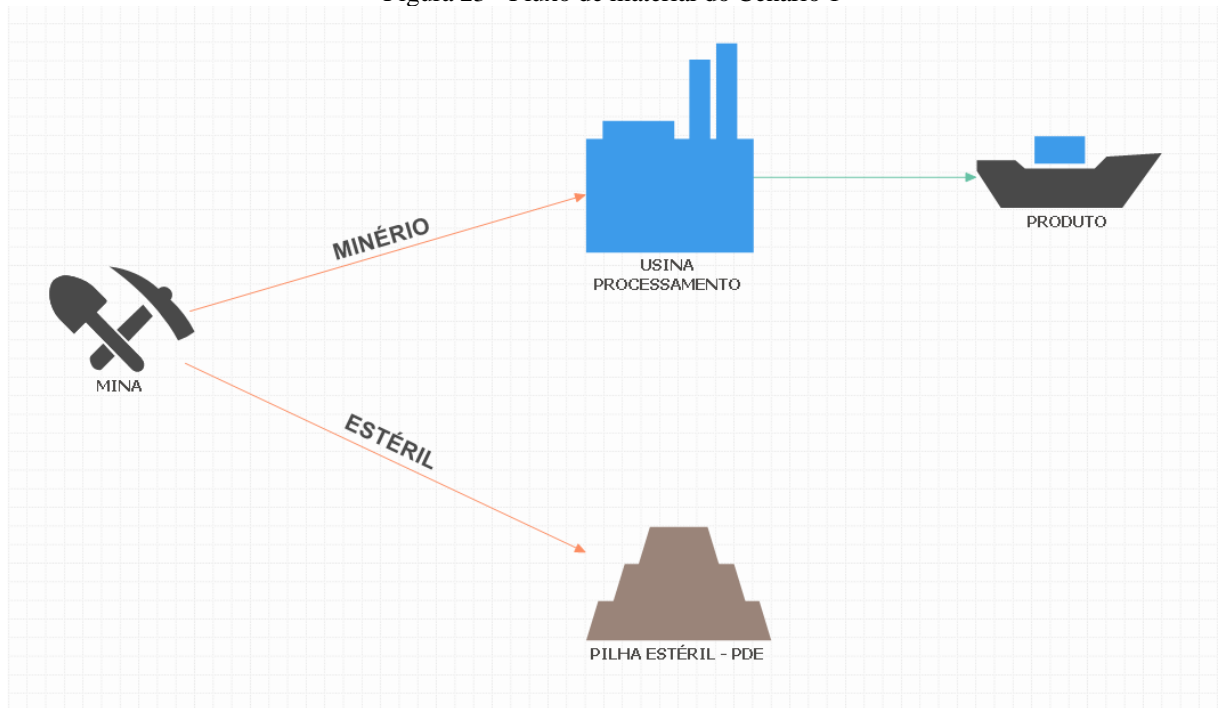
Figura 22 – Deswik.GO - Sink Rate

Phase	Maximum number of benches
1	4
2	4
3	4
4	4
5	4

O Cenário 1 leva em consideração o teor de corte *breakeven* para a maximização do VPL, onde o material minério tem destino exclusivo para a usina enquanto o estéril tem como destino a Pilha de Estéril (PDE), como na Figura 23 que representa o fluxo de material do

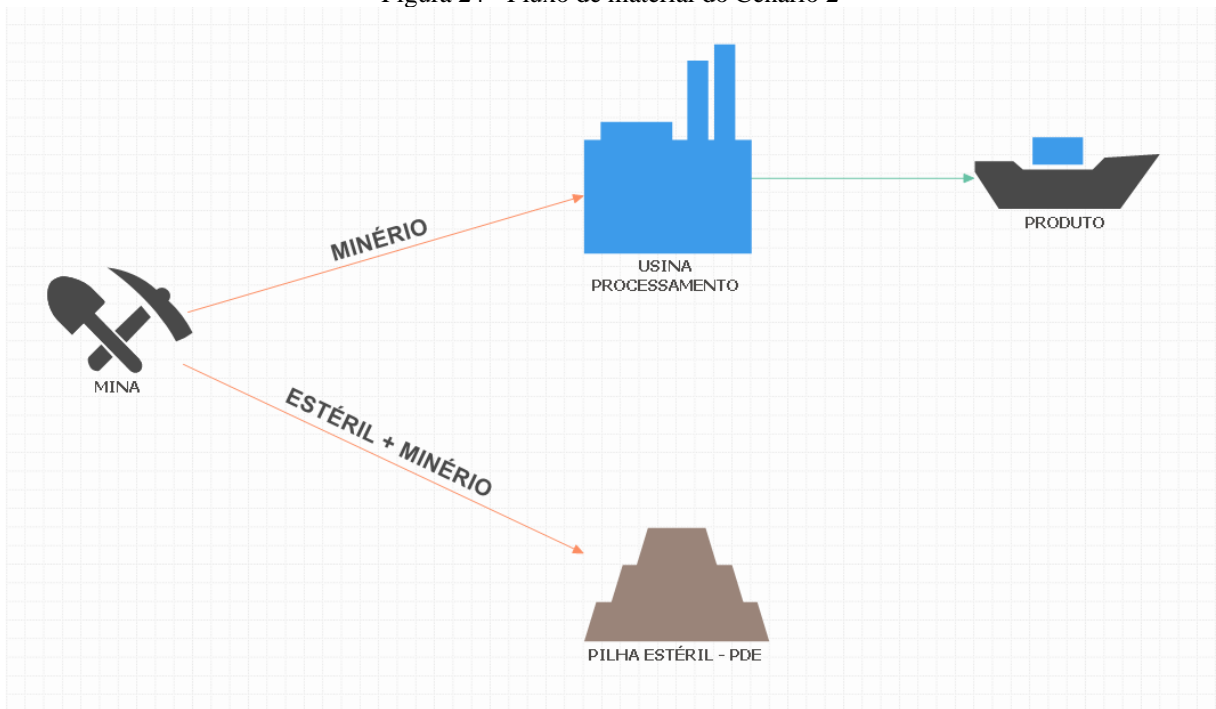
cenário. Em relação às movimentações de massa, para este cenário foi determinada uma movimentação total máxima de 25 Milhões de toneladas por ano, com a alimentação da usina de 10 milhões de tonelada de minério por ano, sendo que para o primeiro ano de alimentação da usina foi adotado um *Ramp up* de no máximo 3 milhões de toneladas.

Figura 23 - Fluxo de material do Cenário 1



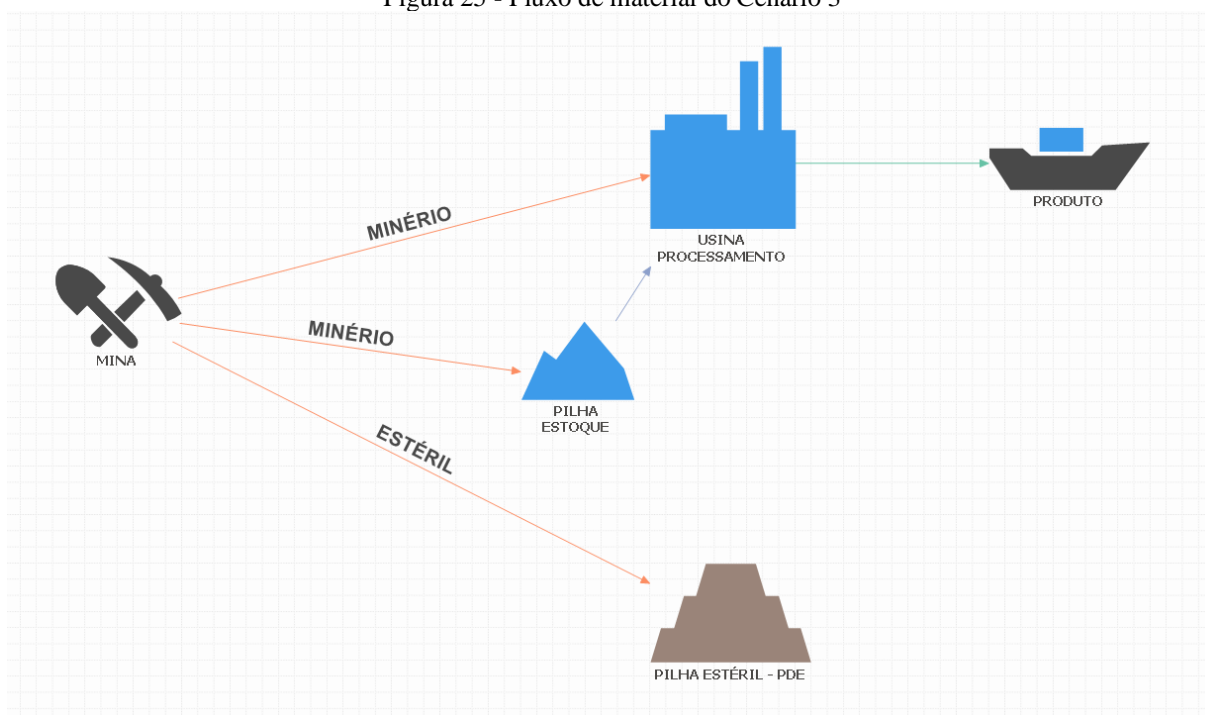
Já o Cenário 2 considera o *breakeven*, mas com a possibilidade de o *software* destinar minério para a PDE, ou seja, neste cenário existe a possibilidade da esterilização do minério de menor teor com o intuito de atingir teores mais altos na alimentação na planta de beneficiamento, como mostra a Figura 24. Esta configuração permite maior produção de metal nos períodos mais próximos ao presente, permitindo a otimização do indicador VPL. As movimentações de massa para este cenário são as mesmas do Cenário 1, com movimentação total de 25 milhões de toneladas por ano e alimentação da usina com 10 milhões de toneladas de minério por ano.

Figura 24 - Fluxo de material do Cenário 2



Para o cenário 3, a definição do *breakeven* é utilizada e, como alternativa para a não esterilização do minério do Cenário 2, foi adicionado ao fluxo de material uma Pilha de Estoque, a qual terá capacidade de 35 milhões de toneladas. Neste cenário, o fluxo de minério para a PDE é descartado, e isso permitirá ao software tomar a decisão de estocar minério na Pilha de Estoque para retomar em períodos futuros com objetivo de maximizar o VPL. As movimentações de massa seguem o Cenário 1, com movimentação total de 25 milhões de toneladas por ano e alimentação da usina com 10 milhões de toneladas de minério por ano.

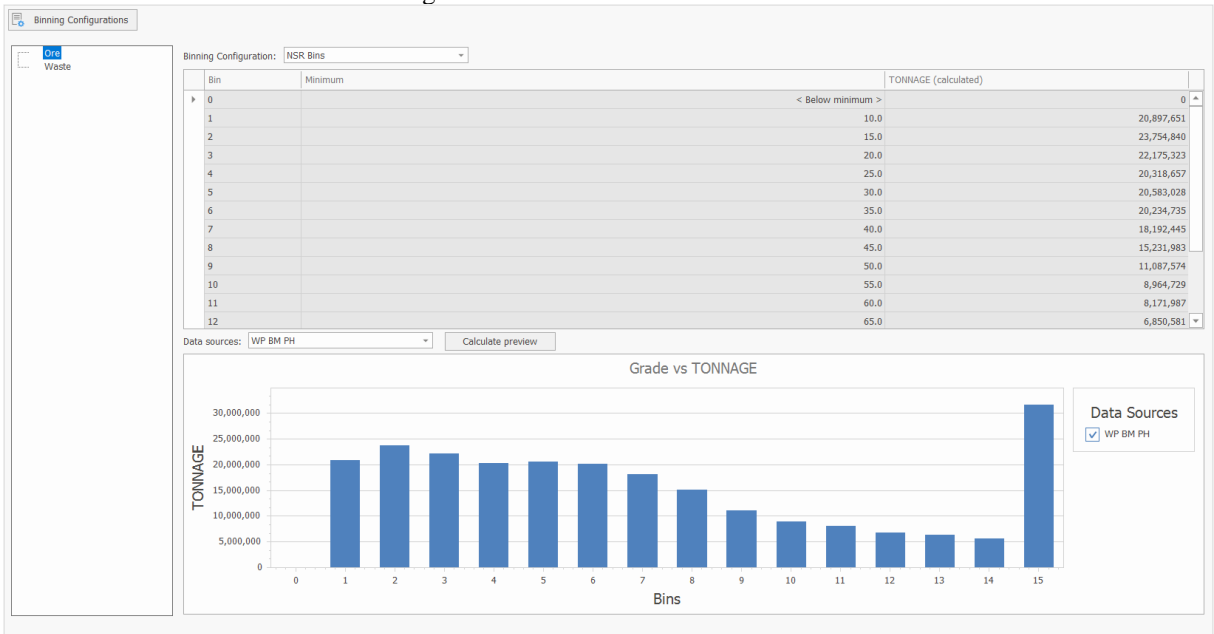
Figura 25 - Fluxo de material do Cenário 3



A solução do *Deswik.GO* a ser utilizada para a criação dos cenários foi o *Phase Bench: Deswik General Solver*, o qual permitiu criar uma regra com faixas dos teores para que o software tenha uma flexibilidade para encontrar soluções mais otimizadas para a destinação do material em cada cenário, principalmente quando um material possui mais de uma possibilidade de destino. A Figura 26 mostra a configuração dos *Material Bins* para os cenários, com a definição de 15 faixas de *bins* que utiliza o campo de NSR do modelo. A solução *Phase Bench* faz um agrupamento dos blocos entre Fase, Bancada, Material e *Bin* para as destinações.

As faixas de intervalo do NSR permitem que o *Deswik.GO* tome decisões mais apropriadas ao fragmentar o agrupamento realizado para destinar determinado material a uma certa faixa do NSR para os possíveis destinos dos cenários. Assim, na mesma bancada e mesmo período o *Deswik.GO* pode decidir fragmentar e mandar uma parcela do material minério para Usina, PDE, Pilha de Estoque ou simplesmente tomar a decisão de não lavrar determinado bloco no momento, mas sim nos períodos futuros. Neste projeto, a configuração do *Material Bins* foi aplicada apenas para o material Minério, de forma que influencia no Cenário 2, com o minério tendo destino para Usina ou PDE e no Cenário 3, com o minério tendo as opções de destino para a Usina ou Pilha de Estoque.

Figura 26 - Deswik.GO - Material Bins



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão discutidos os resultados referentes aos três cenários processados pelo *Deswik.GO* com os pontos para comparação referente à movimentação de material, teor médio do minério no cenário, vida útil, REM, VPL, TIR e *Payback*.

As 5 fases definidas no item 3.3 foram utilizadas nos cenários criados, com um sequenciamento estratégico definido de no máximo 30 anos, ao qual foi fixada pelo usuário uma movimentação total máxima de 25 milhões de toneladas e alimentação da usina de 10 milhões de toneladas. Diante disso, os cenários foram configurados no *Deswik.GO* com as metas determinadas e os campos financeiros considerados (custos de lavra, custos de retomada, custo de processamento, taxa de desconto) e, a seguir, serão apresentados os resultados de cada cenário.

4.1. CENÁRIO 1 – SEQUENCIAMENTO TRADICIONAL

O Cenário 1 corresponde ao que é realizado pela maioria das empresas de mineração quando se trata do planejamento estratégico da lavra, que condiz com a maximização da reserva mineral, onde se determina o *breakeven* para distinguir minério de estéril e as únicas possíveis destinações são a Usina e a PDE. Neste cenário, observou-se que a maior parte da massa de estéril, 68%, foi postergada para ser lavrada entre o Ano 8 ao Ano 17, como mostra a Figura 27, aumentando a receita e diminuindo os custos de lavra nos primeiros 7 anos.

Já a restrição de alimentação da Usina foi respeitada com a lavra dos 240,3 milhões de toneladas de minério, respeitando no 1º ano de lavra o *ramp up* máximo da usina de 3 milhões de toneladas. Ademais, a REM média do cenário ficou em 0,8, e vida útil da mina foi de 27 anos com a contagem do ano de implementação do projeto.

Figura 27 - Movimentação do material – Cenário 1

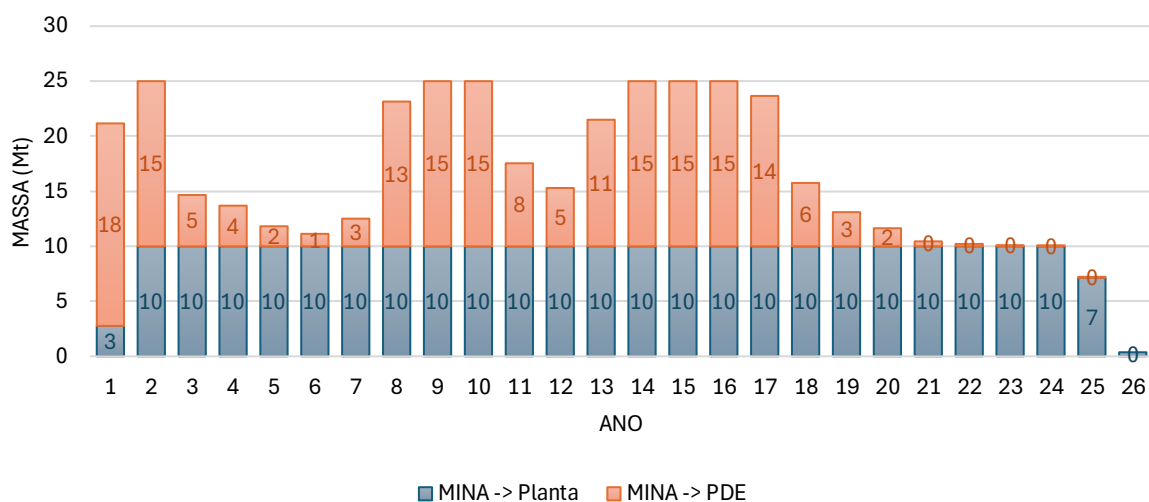
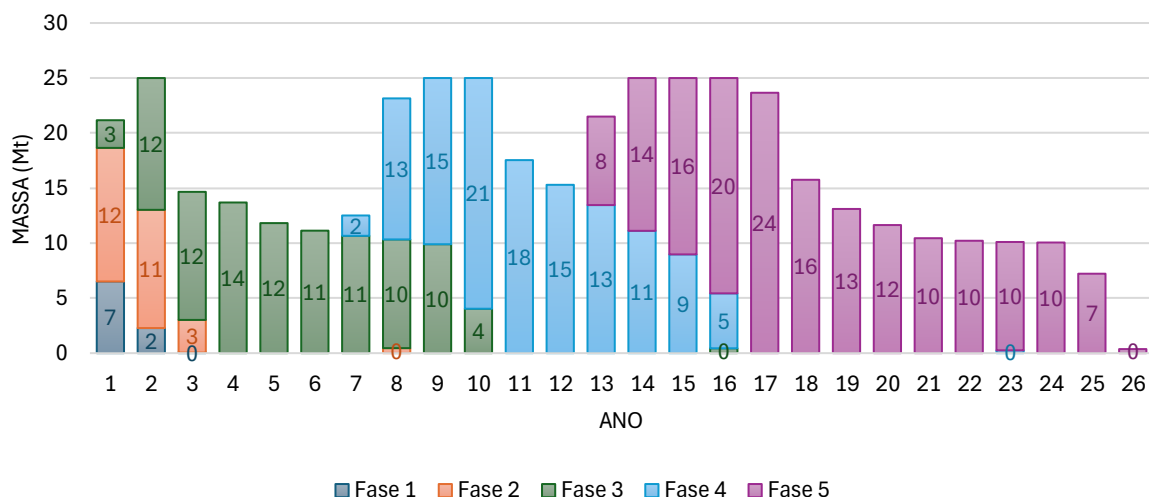
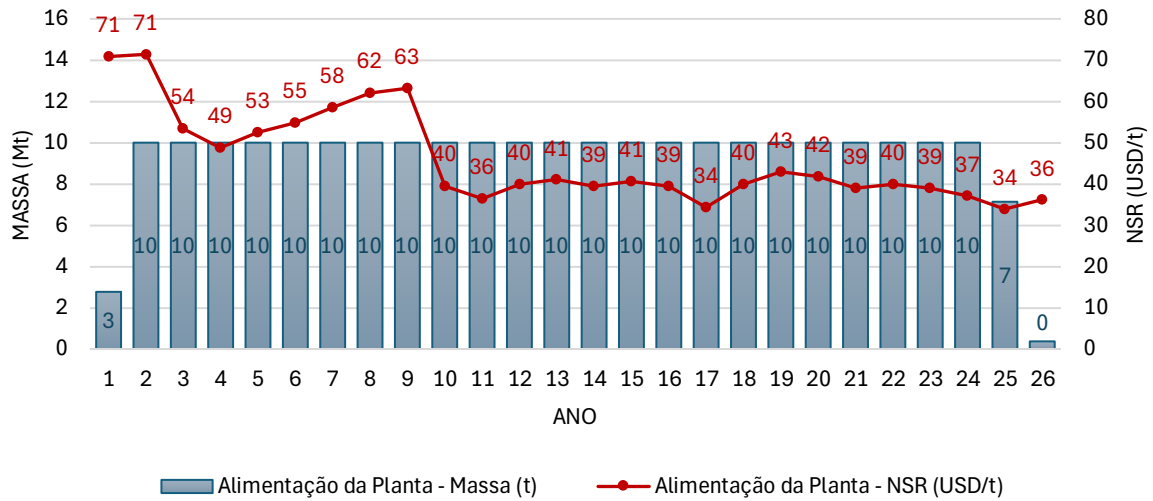


Figura 28 - Movimentação do material por fase – Cenário 1



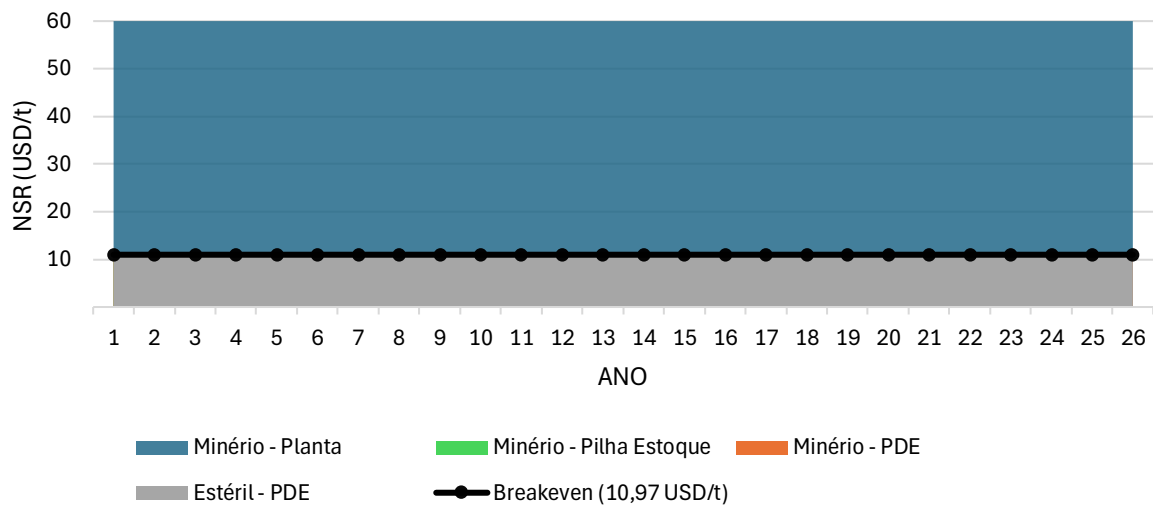
Na Figura 29, o NSR médio nos dois primeiros anos do cenário obteve valores significativos em função do bom teor presente nas Fases 1, 2 e 3, como mostra a Figura 28 e a Tabela 7. Já a partir do ano 3 da lavra o valor do NSR teve um decréscimo justificado pela falta de material da fase 1 e 2, tendo uma recuperação no ano 9 com a lavra de material rico da fase 4. A partir do ano 10 o teor médio ficou entre a faixa de 43 a 34 USD/t, o que é de se esperar, uma vez que o cenário preferiu adiantar a receita nos primeiros 9 anos de lavra. Por fim, o NSR médio do cenário foi correspondente a 45,8 USD/t.

Figura 29 – NSR da alimentação da planta – Cenário 1



A política do teor de corte, como mostra a Figura 30, classificou o material e destinou para seus respectivos destinos com a maximização da reserva mineral, mantendo assim o valor predefinido de teor de corte *breakeven* 10,97 USD/t ao longo de todos os anos de lavra.

Figura 30 - Política do teor de corte – Cenário 1



O fluxo de caixa do cenário é apresentado pela Figura 31, o qual teve um adiantamento da receita, influência esta referente ao valor do dinheiro no tempo, sendo calculado um *payback* de 4,4 anos. O VPL foi calculado em 1.374 milhões USD, apresentado pela Figura 32, com CAPEX de 1.500 milhões USD. Diante disso, o TIR do cenário correspondeu a um valor de 22%, sendo condizente com a realidade de empreendimentos minerários de cobre.

Figura 31 – Fluxo de Caixa – Cenário 1

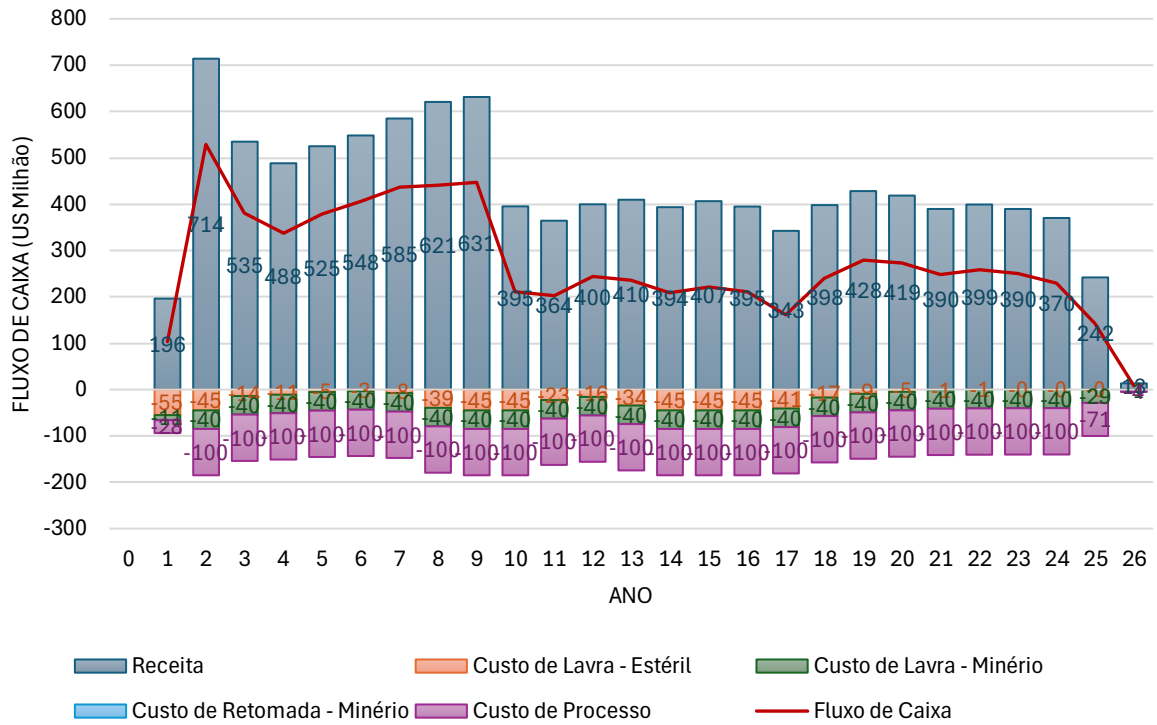
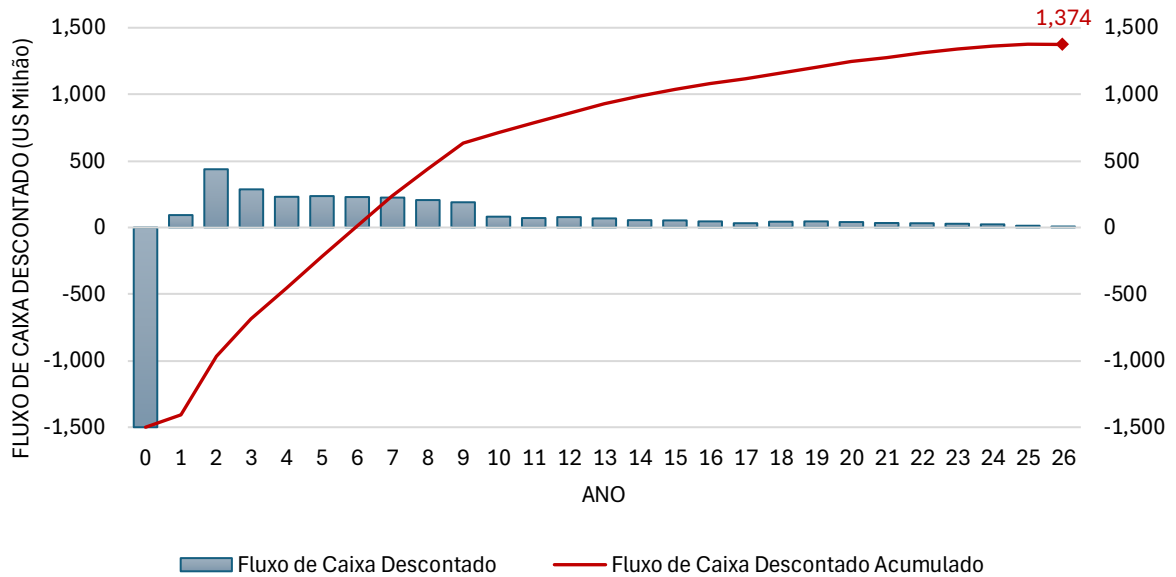


Figura 32 - Fluxo de Caixa Descontado – Cenário 1



A mudança nos parâmetros técnicos e financeiros pode resultar em mudanças significativas no teor de corte, impactando diretamente a rentabilidade do projeto e a quantidade de minério a ser extraído. Diante dessa situação, o cenário representa risco considerável, pois exige revisões constantes do plano de lavra para se adequar às novas condições financeiras e operacionais. Essas adaptações podem gerar retrabalhos e aumentar os custos operacionais,

elevando a complexidade do gerenciamento de recursos e, potencialmente, comprometendo o cronograma inicial. Além disso, ajustes no teor de corte aumentam a exposição do projeto a flutuações do mercado, o que exige uma gestão mais cuidadosa para evitar impactos financeiros imprevistos.

Outro aspecto importante é que as revisões no plano de lavra demandam maior consumo de recursos, como mão de obra e equipamentos, e ampliam o risco de erros operacionais devido a mudanças não planejadas nas etapas de execução. Essas modificações também aumentam a pressão sobre a gestão financeira, uma vez que as variações nos custos operacionais afetam diretamente o fluxo de caixa do projeto. Tais fatores representam riscos à viabilidade do empreendimento, que pode ter seu retorno financeiro prejudicado e sua sustentabilidade econômica comprometida a médio e longo prazo, exigindo estratégias adicionais para minimizar o impacto dessas incertezas no desempenho financeiro.

4.2. CENÁRIO 2 - TEOR DE CORTE DINÂMICO

O cenário de otimização do teor de corte teve como objetivo a maximização de valor (VPL), uma vez que o material classificado como minério pode ser, também, destinado para o destino PDE, de acordo com a estratégia encontrada pelo *Deswik.GO*. Na Figura 33, pode-se perceber que a movimentação total de material chegou no limite de 25 milhões de toneladas nos 14 primeiros anos do projeto, diminuindo esse valor nos anos finais, como previsto. Diante disso, a quantidade de material destinado para a PDE foi de 241,3 milhões de toneladas, um aumento de 30,6% de estéril em relação ao Cenário 1, ou seja, 56,5 milhões de toneladas de material classificado como minério foi esterilizado e enviado para a PDE, como mostra a Figura 35.

Em relação à reserva mineral, houve uma redução de 23,6% se comparado com o Cenário 1, sendo que este cenário obteve uma reserva mineral de 183,7 milhões de toneladas, mas manteve a alimentação da usina em 10 milhões de toneladas entre os anos 2 e 19 de lavra, sendo o 1º ano com uma alimentação máxima do *Ramp Up* de 3 milhões de toneladas. Com a diminuição da reserva, a vida útil da mina resultou em 21 anos contando o 1º ano de implementação, uma diminuição de 6 anos em relação ao Cenário 1, e uma REM de 1,3.

Figura 33 – Material movimentado – Cenário 2

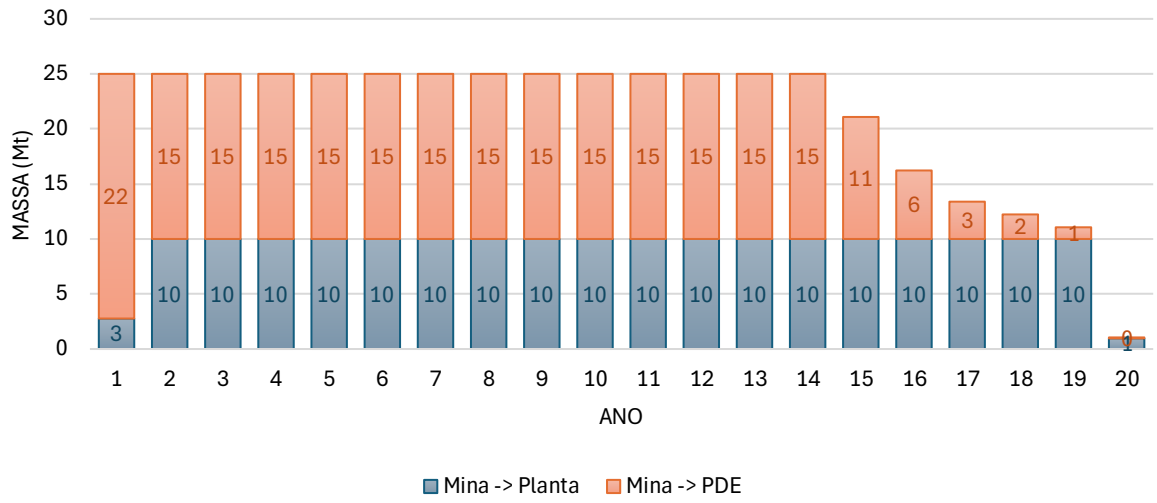


Figura 34 – Massa movimentada por fase – Cenário 2

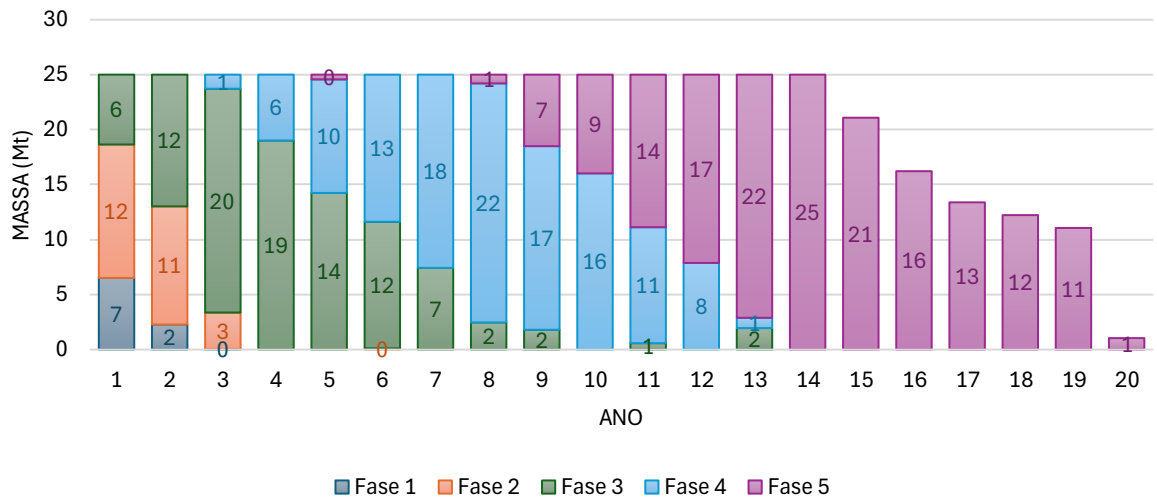
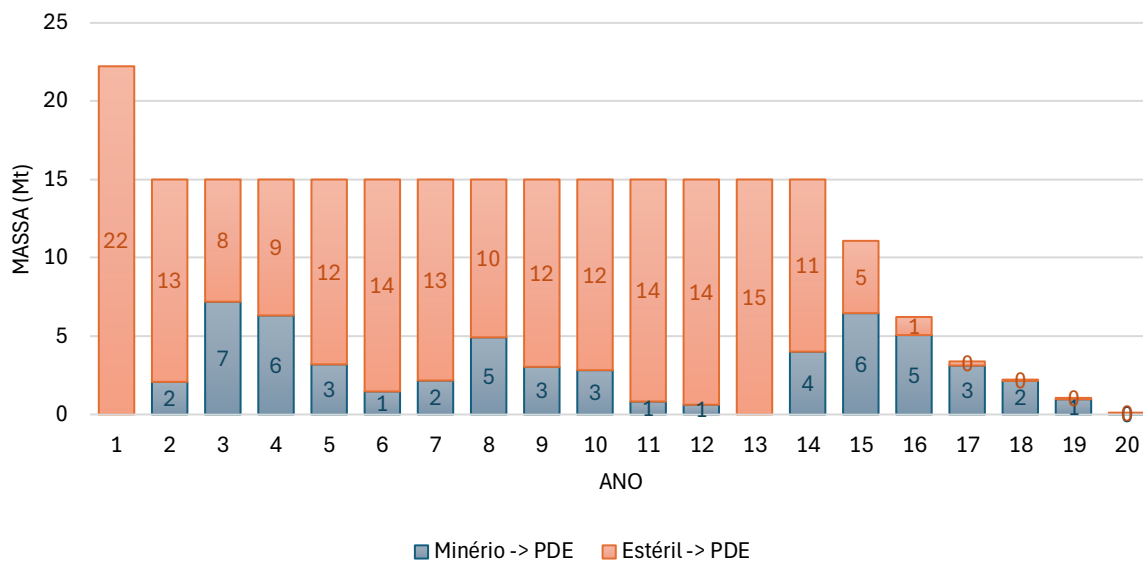


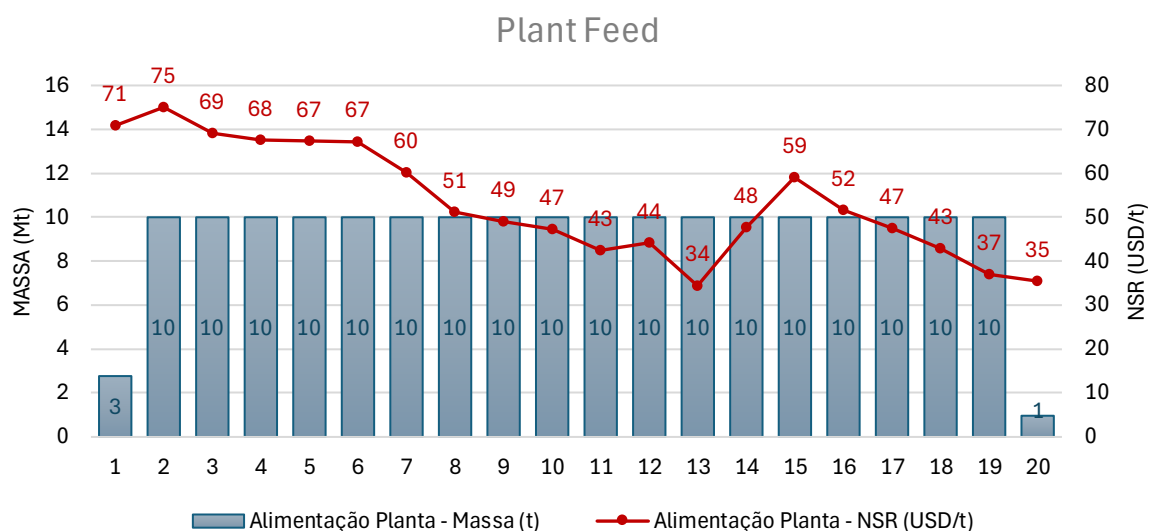
Figura 35 – Material movimentado para PDE – Cenário 2



Este cenário mantém a predominância da lavra das fases 1, 2 e 3 nos 3 anos iniciais, como apresenta a Figura 34, de modo que nesses anos se encontram os maiores NSR do cenário. Na Figura 36, é possível observar que o NSR começa em 71 USD/t no 1º ano, atinge o pico máximo de 75 USD/t no 2º ano e do ano 3 ao 6 mantém um intervalo de NSR entre 69 e 67 USD/t, valores esses superiores ao encontrado no Cenário 1. A partir do ano 7 o NSR tende a diminuir ao longo dos anos, com algumas variações e predominância da lavra das fases 4 e 5. Há um ponto baixo de 34 USD/t no 13º ano, seguido por uma recuperação nos anos subsequentes, mas com uma tendência geral de queda, chegando a 35 USD/t no último ano.

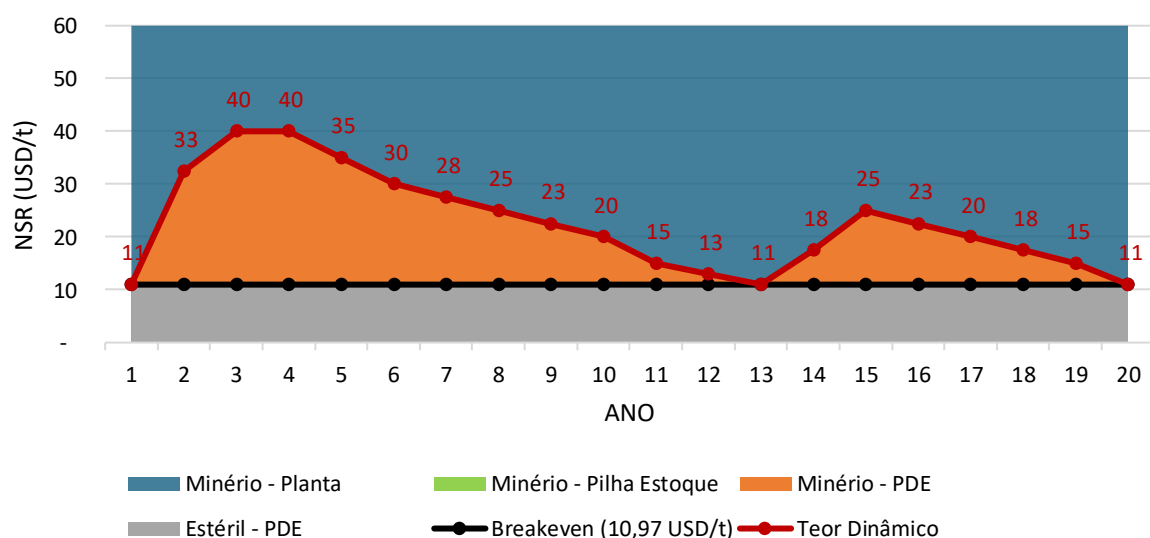
Dessa forma, a decisão do GO de enviar minério para a PDE em alguns períodos, como mostra a Figura 35, permitiu com que a média do NSR do cenário fosse para 53,6 USD/t, um aumento considerável, 17%, em relação ao Cenário 1, que foi de 45,8 USD/t.

Figura 36 – NSR da alimentação da planta – Cenário 2



Na política do teor de corte, Figura 37, percebe-se que o teor de corte dinâmico se torna realidade no cenário, principalmente, na flexibilização da decisão de envio de blocos de minério para os destinos Usina ou PDE. Por meio desses teores de corte, é possível notar na Figura 35, que a movimentação de minério para a PDE aconteceu na maioria dos anos, com as maiores movimentações nos anos 3, 4, 8, 15 e 16. Isso pode ser justificado pela otimização dos teores de corte no cenário com o intuito de maximizar valor.

Figura 37 – Política de teor de corte – Cenário 2



Com a otimização do teor de corte, o cenário preferiu adiantar a receita com os maiores picos nos primeiros 7 anos de lavra, favorecendo assim o fluxo de caixa, como visto na Figura

38. Em comparação ao Cenário 1, o *payback* do cenário chegou a um valor de 3,7 anos, uma redução de 16%. O VPL calculado é mostrado na Figura 39, com um valor de 1.573 milhões de USD, um aumento significativo de aproximadamente 200 milhões de USD (14,5%). Já a TIR alcançou um valor superior ao Cenário 1, correspondente a 25%, um aumento de 3,0 p.p.

Dessa forma, no fluxo de material criado para o cenário, que permite o envio de minério para a PDE, foi possível comprovar, pela decisão do *Deswik.GO* uma quantidade considerável de esterilização do minério. Isso proferiu em uma redução na reserva mineral, mas contribuiu para a otimização do VPL, com o maior valor entre os Cenários 1 e 3.

Figura 38 – Fluxo de caixa – Canário 2

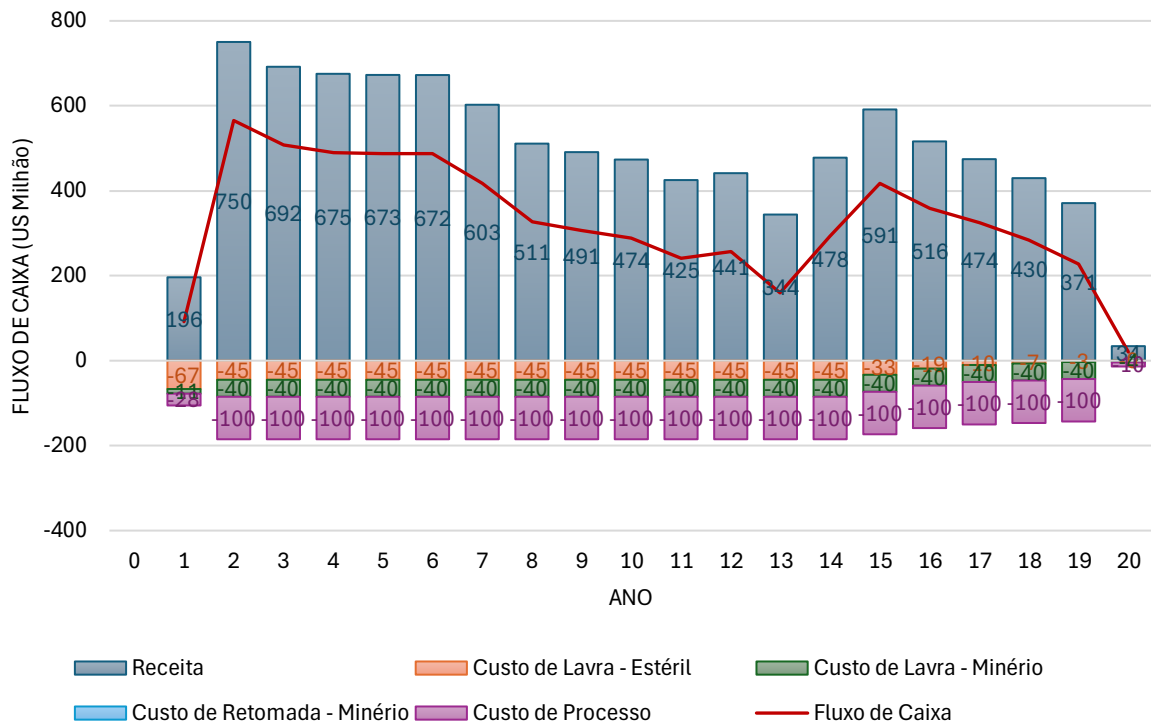
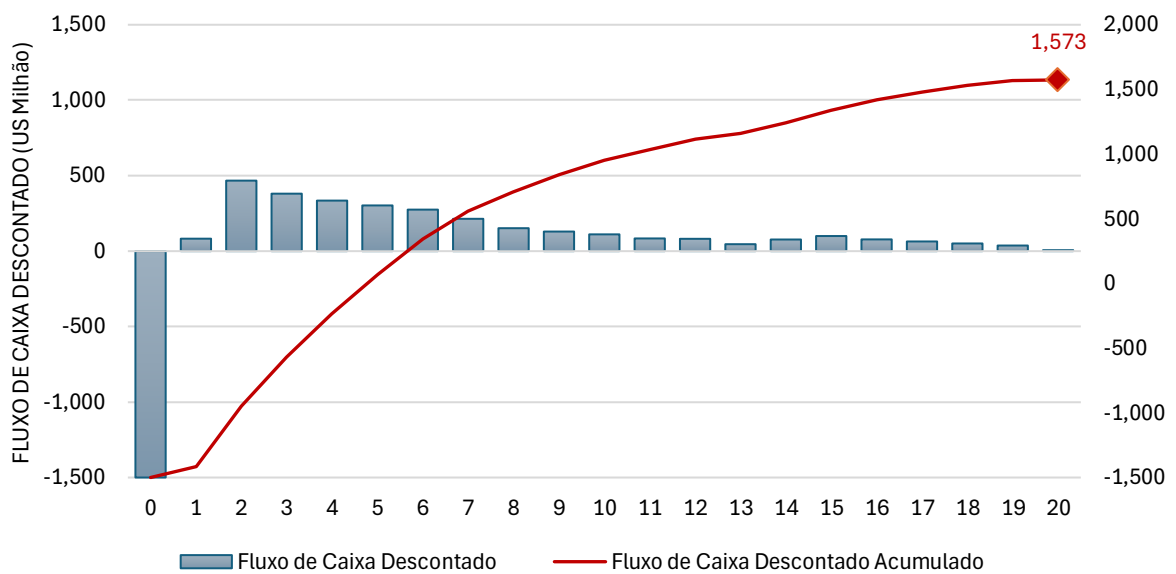


Figura 39 - Fluxo de caixa descontado – Cenário 2



Ao minimizar os riscos presentes no Cenário 1, este cenário reduz o aproveitamento do recurso mineral, o que, por consequência, diminui a vida útil do projeto e gera um risco temporal significativo. A redução da vida útil implica em menor tempo para diluir os custos fixos, o que aumenta a necessidade de capital de giro para manter a operação viável em prazos mais curtos. Esse encurtamento impacta diretamente o retorno financeiro esperado, pois aumenta a pressão

sobre a recuperação de capital e exige altos índices de retorno em um período limitado, afetando a atratividade do projeto, especialmente em cenários com menor rentabilidade.

Além disso, a redução na duração do projeto eleva o risco de capital, pois é necessário assegurar que os recursos financeiros serão suficientes para sustentar a operação em um horizonte mais curto. Esse encurtamento limita o potencial de exploração e de geração de receita ao longo do tempo, comprometendo o fluxo de caixa e elevando o risco de desequilíbrio entre custos e receitas. Para sustentar o projeto sob essas condições, pode ser necessário realizar revisões frequentes nos parâmetros financeiros e adotar estratégias específicas que equilibrem o retorno desejado com o prazo limitado de operação, visando manter a viabilidade econômica do empreendimento.

4.3. CENÁRIO 3 – OTIMIZAÇÃO TEOR DE CORTE COM PILHA DE ESTOQUE

O terceiro cenário considerou os objetivos referentes aos Cenários 1 e 2, ao qual permitiu a maximização da reserva mineral e, ao mesmo tempo, a maximização do VPL. Em relação à reserva mineral, o cenário manteve o correspondente do Cenário 1 com um valor de 240,3 milhões de toneladas de minério. Na Figura 40, é possível notar que, dessa massa de minério, 181,8 milhões de toneladas foram destinadas diretamente para a usina, enquanto 58,5 milhões de toneladas foram destinadas para a Pilha de Estoque para retomadas futuras.

Do material que estava sendo esterilizado no Cenário 2, o *Deswik.GO* tomou a decisão de destinar esse material para a Pilha de Estoque, sendo que nos 5 primeiros anos correspondeu as maiores alimentações do estoque, com um valor de 30,8 milhões de minério, com a retomada do material a partir do ano 6. Além disso, a meta de alimentação da usina manteve os 10 milhões de toneladas entre o ano 2 e 24 de lavra, sendo o 1º ano com uma alimentação máxima do *Ramp Up* de 3 milhões de toneladas.

Este cenário seguiu a tendência do Cenário 1 referente aos períodos de máxima de movimentação total, períodos de movimentação do estéril, vida útil e REM. Sendo assim, a uma movimentação total máxima do material chegou no limite de 25 milhões de toneladas em alguns anos, principalmente entre os anos 6 e 15, ao qual teve a maior movimentação de estéril de 130,4 milhões de toneladas, com uma vida útil do projeto de 26 anos com o ano de implementação e uma REM média de 0,8.

Figura 40 - Material Movimentado – Cenário 3

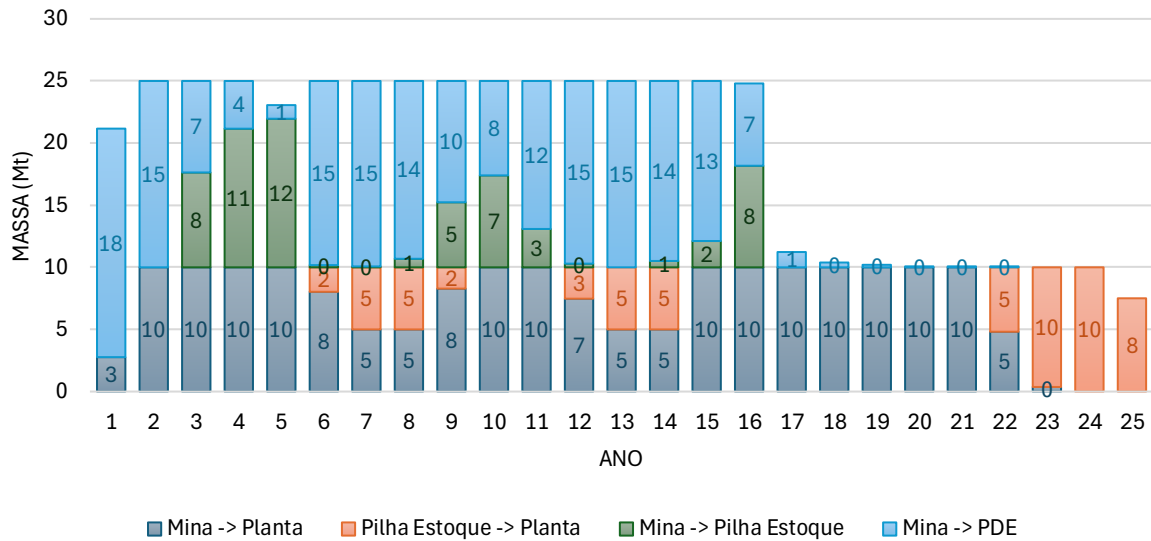
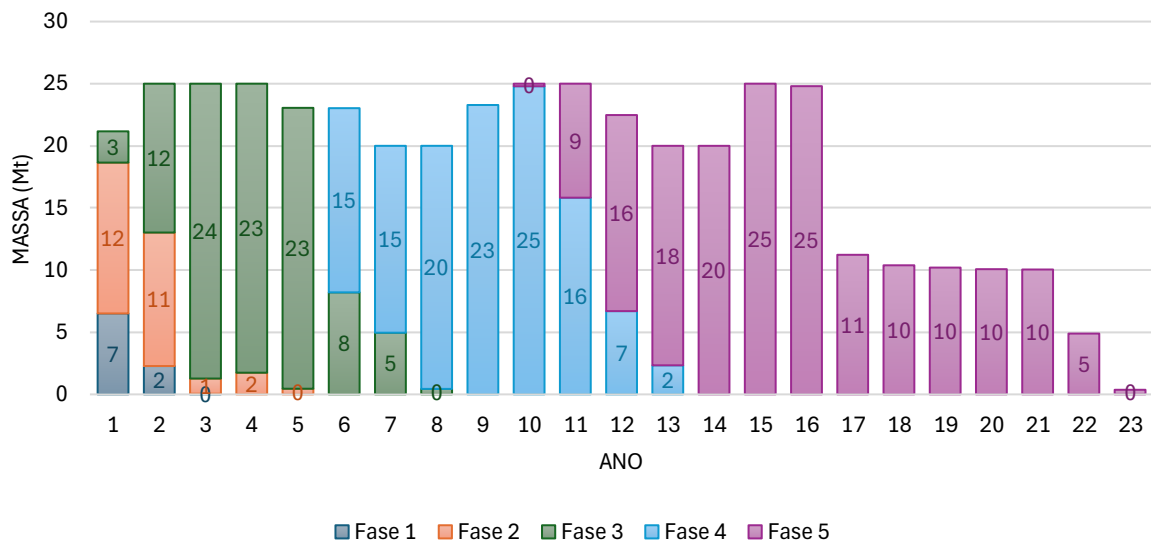
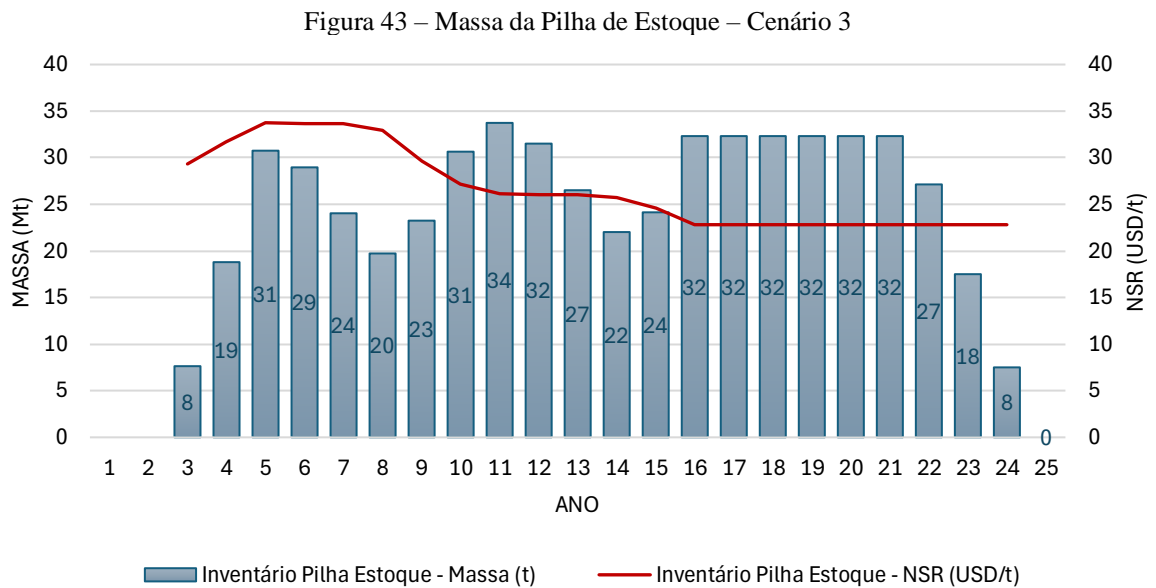
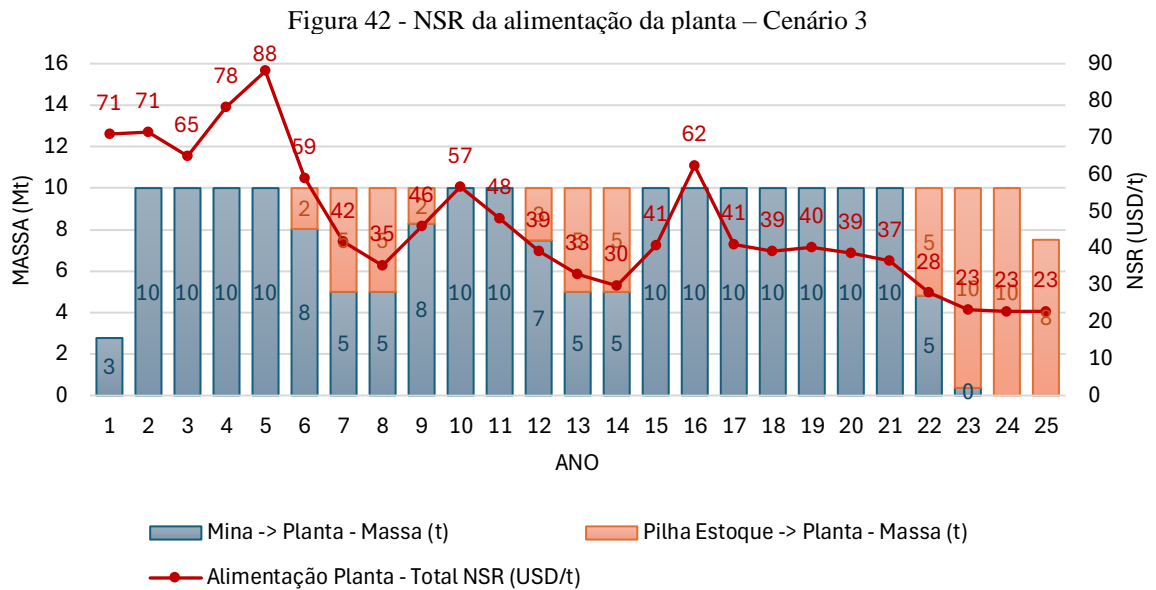


Figura 41 - Material movimentado por fase – Cenário 3



Nos 5 primeiros anos da lavra, as fases 1 e 2 são lavradas por completo e 85% da fase 3 é lavrada, sendo esses anos os que apresentam os maiores NRS, como mostra as Figuras 41 e 42. Assim, pode-se concluir, como nos outros cenários, que este cenário também priorizou a lavra do material mais rico a fim de adiantar receita, com o maior pico de NSR em relação aos outros cenários, sendo no ano 5, com um valor de 88 USD/t. Após este ano, o NSR tende a diminuir, com alguns picos de elevação nos anos 10 e 16, e os menores picos nos últimos 3 anos, de acordo com a Figura 42. Os períodos de queda do NSR podem ser justificados pelas retomadas da pilha de estoque, a qual apresenta um material de baixo teor que varia entre os NSR de 33,8 a 22,8 USD/t, como visto na Figura 43.



A Figura 44 mostra uma representação de como o teor do minério foi distribuído ao longo da vida útil do projeto, refletindo a aplicação de teores de corte dinâmicos do material destinado à Usina e à Pilha de Estoque. A abordagem do teor dinâmico neste cenário ajusta o teor de corte ao longo do tempo possibilitando a maximização do VPL. Nos anos em que uma grande quantidade de minério é estocada, ano 3 a 5, pode-se inferir que o teor de corte foi elevado temporariamente, tornando o processamento desse minério menos atrativo economicamente. Em vez de processá-lo imediatamente, optou-se por estocá-lo, com a

expectativa de que, em anos futuros, a mudança nas condições econômicas tornaria seu processamento mais lucrativo.

Nos períodos em que o minério é predominantemente enviado para a planta, o teor de corte provavelmente foi ajustado para um valor mais baixo, incentivando o processamento do minério estocado ou recém-extraído, tornando economicamente viável processar minério de teor mais baixo que, de outra forma, seria considerado estéril. Assim, a utilização de teores de corte dinâmicos é uma prática essencial para otimizar o retorno econômico em um cenário de preços e custos voláteis, permitindo que a operação mineira se adapte às condições de mercado de forma ágil.

O ganho econômico pode ser observado nas figuras abaixo. Segundo a Figura 45, nos primeiros anos, ano 1 ao 5, há um crescimento acentuado do fluxo de caixa operacional, correspondente a um aumento na receita, impulsionado pelo processamento do minério de alto teor, seguindo a tendência dos outros cenários em adiantar receita. Contudo, os pontos de queda da receita podem ser justificados pelo processamento de material de baixo teor da Pilha de Estoque. Já na Figura 46, é possível observar o ganho significativo de NPV se comparado ao Cenário 1, onde os dois cenários mantêm o valor da reserva mineral, mas com um aumento de 188 milhões USD.

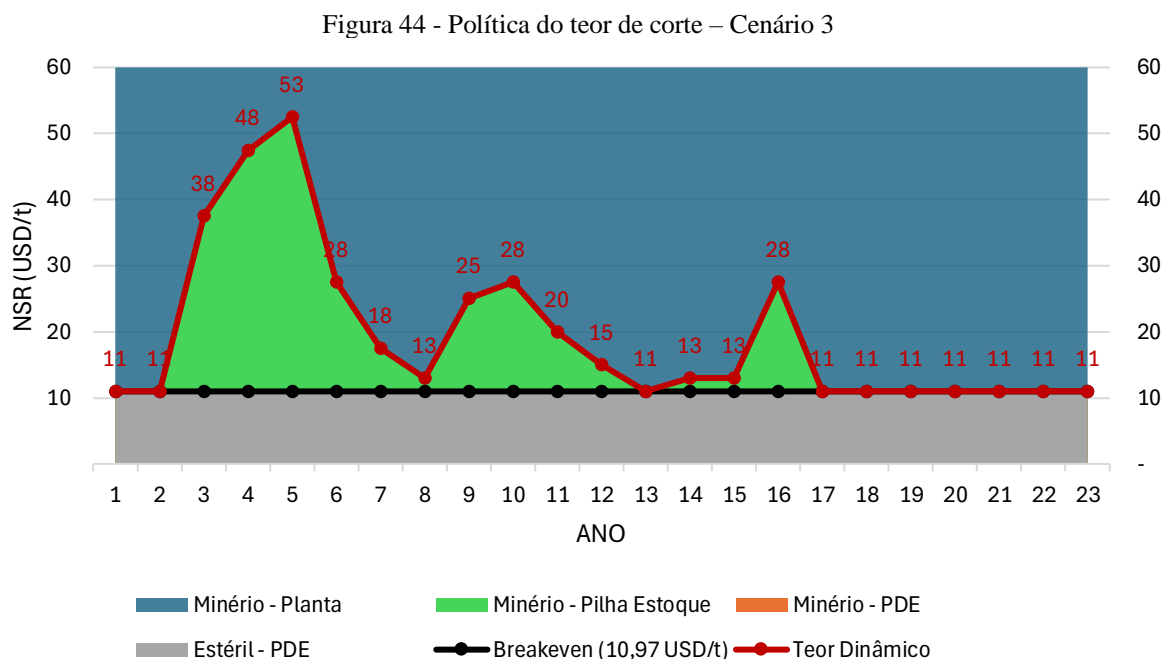


Figura 45 - Fluxo de caixa – Cenário 3

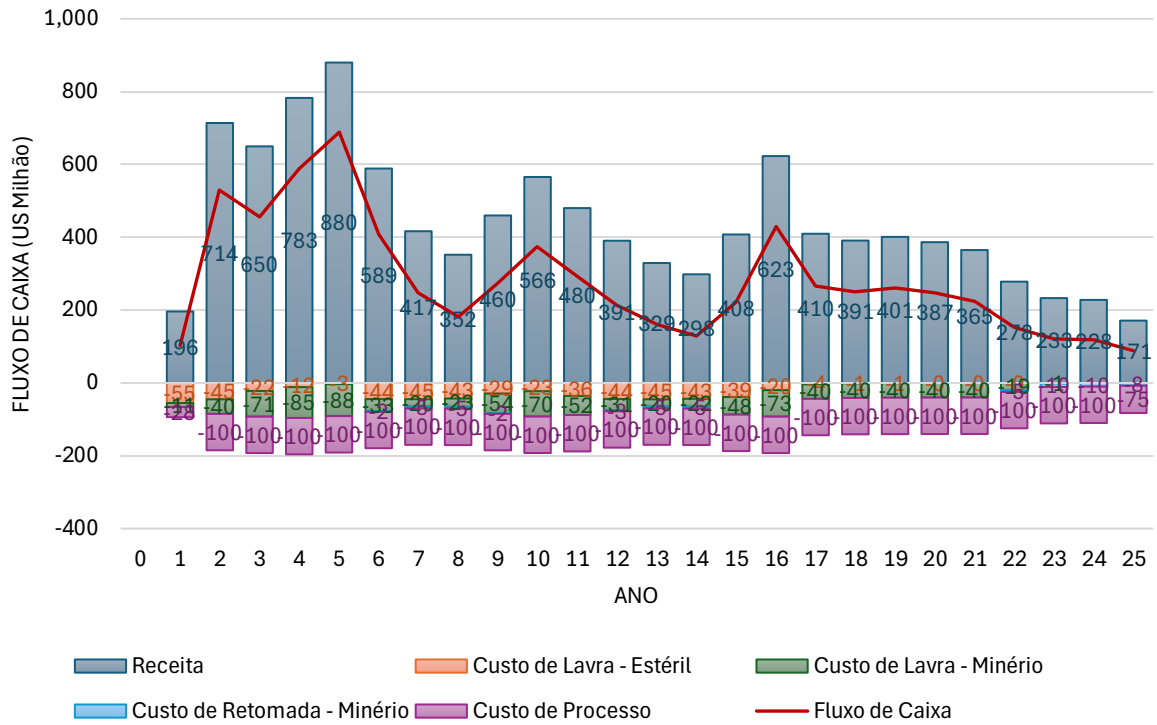
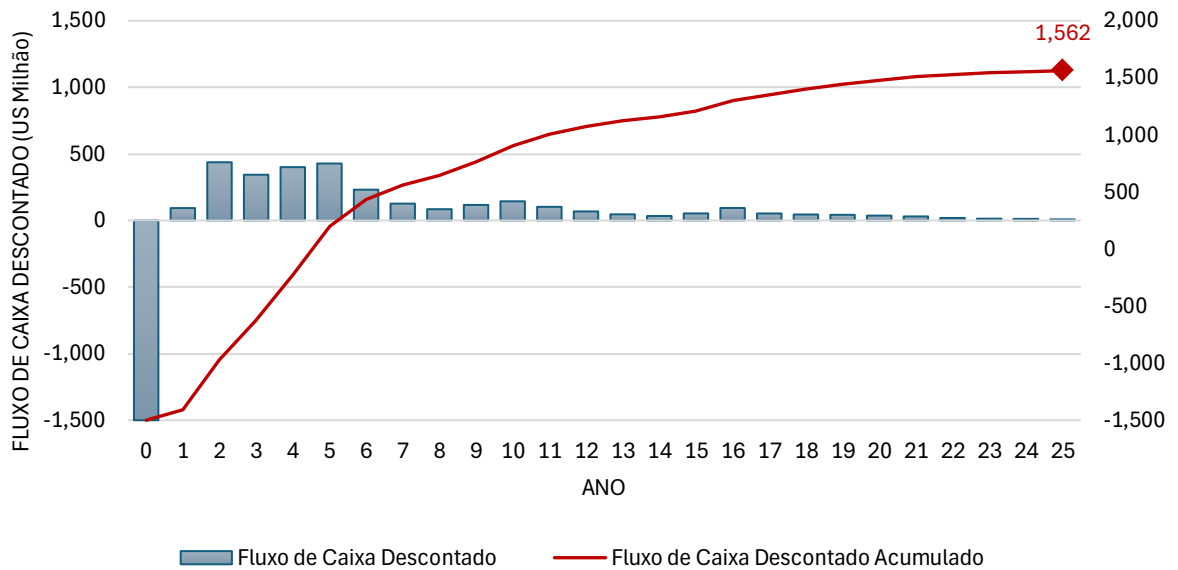


Figura 46 - Fluxo de caixa descontado – Cenário 3



Este cenário apresenta riscos ligados à localização da pilha de estoque, pois exige investimento em áreas específicas, que precisam ser adquiridas ou preparadas para acomodar o estoque de minério. Esse processo pode ser financeiramente oneroso e incluir custos de licenciamento ambiental, preparação do solo e infraestruturas de contenção. Além disso, a localização inadequada da pilha de estoque pode elevar o risco de impactos ambientais, como

a drenagem ácida, que requer controle rigoroso para evitar contaminação do solo e das águas próximas.

Outro risco importante é a potencial perda de eficiência na recuperação do minério devido à oxidação do material armazenado na pilha de estoque. A oxidação pode comprometer a qualidade do minério, reduzindo a recuperação metalúrgica e gerando custos adicionais para tratamento e beneficiamento. Isso impacta diretamente a rentabilidade do projeto, pois um menor volume de metal recuperado reduz o valor comercial e aumenta a dependência de processos de purificação adicionais, o que pode gerar mais custos para o empreendimento e comprometer o fluxo de caixa projetado.

5. CONCLUSÃO

O estudo realizado confirma a importância da utilização de teor de corte dinâmico como ferramenta essencial para a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) em projetos minerários. Ao longo da pesquisa, foram analisados três cenários distintos, demonstrando que o ajuste do teor de corte em função das variáveis econômicas e operacionais ao longo do tempo proporciona um aumento significativo na rentabilidade do empreendimento. A aplicação do método de Lane, com suporte de um otimizador global, mostrou-se eficaz na criação de cenários realistas e adaptáveis às flutuações do mercado.

Os três cenários analisados neste estudo, apesar de suas diferenças nas abordagens de otimização do teor de corte, mantiveram a alimentação da planta em um nível constante de 10 milhões de toneladas por ano. Esse controle foi essencial para garantir a estabilidade operacional e financeira da mina, maximizando a eficiência de processamento sem sobrecarregar as capacidades da planta. O equilíbrio entre a alimentação constante e o controle da produção permite que o planejamento de lavra seja executado com maior previsibilidade, evitando flutuações abruptas na produtividade.

Na Tabela 10, é possível analisar o resultado referente a cada cenário, no qual o Cenário 3 demonstrou um diferencial importante ao abranger as características positivas tanto do Cenário 1, com o teor de corte *breakeven*, quanto do Cenário 2, que evitou a esterilização de minério. Ao combinar esses dois elementos, o Cenário 3 conseguiu não apenas manter a maximização do VPL, como também garantir que nenhum minério viável fosse descartado, o que contribuiu diretamente para o aumento da eficiência do projeto.

Tabela 10 - Resultados dos cenários

	Reserva Mineral (Mt)	VPL (US\$ Milhão)	Payback (anos)	TIR (%)	REM (t/t)
Cenário 1	240,3	1.374	4,4	22,0	0,8
Cenário 2	183,7	1.573	3,7	25,0	1,3
Cenário 3	240,3	1.562	3,7	24,7	0,8

A adoção de pilhas de estoque, como demonstrado no Cenário 3, mostrou-se fundamental para a manutenção das reservas e o aumento do VPL ao longo do tempo. Entretanto, ter como objetivo a maximização das reservas minerais não tem, necessariamente, como consequência a maximização do VPL de um projeto de mineração. Isso foi comprovado

com o Cenário 2, que apresentou o maior VPL reduzindo reserva, no qual foi adotada a estratégia de esterilização de minério. Já com o Cenário 3, as pilhas de estoque permitiram que o minério de menor teor fosse armazenado e processado em momentos mais favoráveis, garantindo flexibilidade para que o projeto se ajuste às variações de mercado e otimize os recursos disponíveis. Esse aspecto é especialmente relevante para prolongar a vida útil da mina, ao mesmo tempo em que se maximiza o retorno financeiro.

Um dos principais resultados obtidos foi a comprovação de que a utilização de pilhas de estoque, aliada a teores de corte ajustáveis, permite prolongar a vida útil do empreendimento, ao mesmo tempo que otimiza o uso dos recursos minerais disponíveis. A abordagem dinâmica favorece a flexibilidade nas operações, possibilitando que o projeto responda de maneira mais eficiente às variações nos preços das commodities e nas condições operacionais, diferente do Cenário 1, em que o método tradicional de embasar as operações mineiras no teor de corte *breakeven* traz maior risco, já que qualquer variação das variáveis envolvidas tem potencial de mudar o planejamento.

Outro ponto relevante do estudo foi a aplicação do método de Lane de forma integrada com as técnicas de otimização global. Essa abordagem permitiu não apenas a maximização do VPL, mas também uma análise mais precisa dos custos e benefícios envolvidos em cada fase do processo de mineração. Os resultados indicam que, ao ajustar os parâmetros de operação com base em um teor de corte dinâmico, é possível alcançar um equilíbrio ideal entre os custos de mineração, processamento e refino, maximizando os retornos financeiros.

Em termos práticos, a pesquisa oferece uma importante contribuição para o setor de mineração, fornecendo uma base técnica para a tomada de decisões estratégicas no planejamento de lavra. A possibilidade de aplicar teores de corte dinâmicos permite que os gestores adaptem suas operações às condições de mercado em constante mudança, garantindo maior competitividade e sustentabilidade dos projetos minerários ao longo de sua vida útil.

Por fim, o trabalho reforça a necessidade de uma visão mais integrada e dinâmica no planejamento estratégico da mineração. A adoção de técnicas avançadas de otimização, como o uso de teores de corte dinâmicos, apresenta-se como uma solução eficiente para enfrentar os desafios econômicos e ambientais do setor, promovendo o uso mais racional dos recursos minerais e assegurando a viabilidade dos empreendimentos a longo prazo.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, indicam-se:

- Implementar estudos de análise de sensibilidade e de risco em diferentes cenários de planejamento de lavra para verificar a resiliência das operações frente a variações no preço das commodities e nos custos de produção.
- Investigar como a Teoria das Restrições pode ser aplicada para identificar e gerenciar gargalos na cadeia produtiva de mineração, buscando melhorias na eficiência do ciclo de vida da mina e redução de custos operacionais, por meio de softwares de simulação e otimização, como o Deswik.GO
- Comparar a Teoria das Restrições com outras metodologias de planejamento de lavra, como o Método de Lane, avaliando vantagens e desvantagens no contexto de diferentes tipos de jazidas e condições de mercado.
- Analisar como as técnicas de otimização de teor de corte, incluindo a aplicação de teores de corte dinâmicos e o uso de pilhas de estoque, impactam os aspectos ambientais, propondo práticas mais sustentáveis.
- Explorar cenários com variações nas taxas de recuperação metalúrgica, estudando como diferentes níveis de recuperação influenciam o VPL e a vida útil da mina.
- Desenvolver uma análise que compare o desempenho de projetos minerários que utilizam teores de corte estáticos versus dinâmicos, com foco em cenários de longo prazo e os impactos sobre o VPL e os ciclos de vida da mina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, W. E. **Uma análise da importância do plano de aproveitamento econômico no processo de tomada de decisão na mineração**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2017.

ASSIS, A. H. **Teores de corte: uma análise da influência no resultado econômico de um empreendimento mineiro**. 57f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2016.

BREALEY, R. A.; MYERS, S. C.; ALLEN, F. **Princípios de finanças corporativas**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CALAES, G. D. **Planejamento estratégico, competitividade e sustentabilidade na indústria mineral: Dois casos de não metálicos no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: CETEM / MCT / CNPq / CYTED, 2006.

CAMPOS, P. H. A. **Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra: sequenciamento direto de blocos vs. planejamento tradicional**. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2017.

CARLI, C. **Análise de projetos limites: Lavra a Céu Aberto vs. Lavra Subterrânea**. 123f. Dissertação (Mestrado em engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013.

CASTANHEIRA, L. H. **Impacto dos teores de cortes dinâmicos na geração de cavas finais utilizando o software Deswik: uma comparação entre os métodos Pseudoflow e sequenciamento direto de blocos**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

CHANGANANE, A. P. **Estudo dos parâmetros envolvidos na determinação da função benefício na mineração.** 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2017.

CORREA, P. J. Q. B. **Simulação Monte Carlo e análise de sensibilidade na avaliação de projetos de mineração.** TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

DESWIK. **Deswik.GO: Uma única ferramenta para todas as demandas de planejamento estratégico de lavra.** 2024. Disponível em: < <https://www.deswik.com/wp-content/uploads/2020/09/Portuguese-Deswik.GO-Brochure.pdf>>. Acesso em 23 de agosto de 2024.

FARIA, L. R. **Disposição de estéril em cava: um estudo de caso.** 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2016.

FERREIRA, G. E.; ANDRADE, J. G. **Elaboração e Avaliação Econômica de Projetos de Mineração.** Livro Tratamento de Minérios: Rio de Janeiro, 5ª ed., cap 20, p. 899-932. 2010.

FRANCO, A. L.; GALLI, O. C. **Método para análise de investimentos: alternativa para classificação de projetos com prazo e volume de recursos diferentes.** XXVII Encontro de Engenharia de Produção. Paraná. 2007.

FONTOURA, D. M. **Método para auxílio na definição da quantidade de minério liberado.** 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017.

GOLDIE, R.; TREDGER, P. **Net Smelter Return models and their use in the exploration, evaluation and exploitation of polymetallic deposits.** Geoscience Canada, v. 18, n. 4, p. 159-171. Toronto. 1991.

HALL, B. **Cut-off grades and optimising the strategic mine plan.** The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014.

JOEHNK, M. D.; GITMAN, L. J. **Princípios de investimentos**. 8. ed. São Paulo, SP: Pearson, 2005. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 12 jan. 2024.

JUVENAL, R. S. *et al.* **Avaliação econômica de um projeto de mineração de agregados através da técnica de fluxo de caixa descontado**. Engenharias: metodologias e práticas de caráter multidisciplinar 2, cap 7. Ponta Grossa - PR: Atena, p. 71-87, 2020.

LANE, K. F. **Choosing the Optimum Cut-Off Grade**. Colorado School of Mines Quarterly, vol. 59, n. 4, p. 811-829. 1964.

LANE, K. F. **The Economic Definition of Ore: Cut-off grades in Theory and Practice**. Mining Journal Books: London. 1988.

LOBO, L. B. **O sequenciamento verde e seu impacto no valor presente líquido das operações de lavra**. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2023.)

LORENTZ, S. V. **Avaliação técnico-econômica de projetos de eficiência energética em mineração utilizando a teoria das opções reais**. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2012.

NETO, A. A. **Finanças corporativas e valor**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2014.

NETO, A. A. **Matemática Financeira e suas Aplicações**. São Paulo: Grupo GEN, 2022. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559773244/>. Acesso em: 19 jan. 2024

NETO, J. A. S.; FONTES, M. P. **Análise de sensibilidade dos limites da cava final ótima com base na variação do preço de mercado da rocha fosfática**. 2017.

OLIVEIRA, M. P. R.; SOUZA, F. R.; SILVA, J. M. **Otimização da Unidade Mínima de Lavra para o Planejamento de Curto**. Research, Society and Development, v. 11, n. 6. 2022

PERONI, R. L. **Análise da sensibilidade do sequenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico**. 143 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2002.

PESSOA, G. A. **Avaliação de projetos de mineração utilizando a teoria das opções reais em tempo discreto: um estudo de caso em mineração de ferro**. 174f. Dissertação (Mestrado em Gestão Empresarial) – Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro. 2006.

RENDU, J. M. **An introduction to cut-off grade estimation**. 1ª Edição. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2008.

SILVA, N. C. S. **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais**. Tese: Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. **Applied Mineral Inventory Estimation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

SOUZA, F. R. **Sequenciamento Direto de Blocos com Ênfase em Custos de Transporte**. Tese: Doutorado — Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

WHITTLE, D. *et al.* **Strategic Mine Planning**. 8 ed. 2005.