



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



João Antonio Amorim Canhoto

## **SUSTENTABILIDADE DA RESERVA NO SEQUENCIAMENTO LONGO PRAZO**

Recife, novembro de 2024

JOÃO ANTONIO AMORIM CANHOTO

**SUSTENTABILIDADE DA RESERVA NO SEQUENCIAMENTO LONGO PRAZO**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Marinésio Pinheiro de Lima

Coorientador: Gabriel Filinkoski

Recife, novembro de 2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Canhoto, João Antonio Amorim.

Sustentabilidade da reserva no sequenciamento longo prazo / João Antonio Amorim Canhoto. - Recife, 2024.

64 p. : il., tab.

Orientador(a): Marinésio Pinheiro de Lima

Coorientador(a): Gabriel Filinkoski

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Minas - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Mineração Subterrânea. 2. Sublevel Stopping. 3. Geometria de Escavações. 4. Sequenciamento. 5. Indicadores de Sustentabilidade de Reserva. I. Lima, Marinésio Pinheiro de. (Orientação). II. Filinkoski, Gabriel. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

JOÃO ANTONIO AMORIM CANHOTO

**SUSTENTABILIDADE DA RESERVA NO SEQUENCIAMENTO LONGO PRAZO**

Relatório de conclusão de curso aprovado, apresentado a Universidade Federal de Pernambuco, no Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas, com nota final igual a \_\_\_\_\_, conferida pela Banca Examinadora formada pelos professores:

Aprovado em: 25/10/2024

Comissão Examinadora:

---

Prof. Dr. Marinésio Pinheiro de Lima, Departamento de Engenharia de Minas, UFPE.

---

Prof. Dr. Júlio César de Souza, Departamento de Engenharia de Minas, UFPE.

---

Prof. Dr. Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros, Departamento de Engenharia de Minas, UFPE.

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, João Canhoto e Maria Aparecida Amorim, e à minha irmã Cida Dara, por sempre me apoiarem em todos os desafios e em todas minhas decisões.

Ao professor Marinésio Pinheiro, pela orientação desta monografia, por sua amizade e boas conversas fora de sala.

Ao coorientador, meu amigo Gabriel Filinkoski, por todo apoio ao longo de minha vida acadêmica e profissional, e pela coorientação desta monografia.

Ao professor Júlio César, pela coorientação desta monografia, pela amizade compartilhada e pelas diversas discussões promovidas dentro e fora da sala de aula ao longo da minha graduação.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas, por toda contribuição para minha formação profissional, em especial os professores Arthur Ângelo, Márcio Barros, Carlos Magno, Pedro Guzzo, Felipe Brito e o técnico do laboratório de tecnologia mineral Marcelo Gomes por me introduzirem na vida acadêmica e me mostrarem a liberdade do conhecimento.

Aos colegas do curso de Engenharia de Minas pela amizade e boas conversas. A minha namorada Mariana por todo apoio e companheirismo.

Aos colegas de estágio da Datamine e GE21 pela troca de experiências e conhecimento, e por tornarem o ambiente de trabalho mais agradável com sua amizade.

CANHOTO, João Antonio Amorim. **SUSTENTABILIDADE DA RESERVA NO SEQUENCIAMENTO LONGO PRAZO**. 2024. 64. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

## Resumo

Este trabalho aborda a aplicação de indicadores de reserva no planejamento de longo prazo de uma mina subterrânea polimetálica (ouro, cobre, prata e cobalto). Focando nos indicadores de reserva desenvolvida, acessada e liberada para lavra, o estudo explora a relação desses parâmetros com o planejamento estratégico da operação. A metodologia adotada inclui a definição do método de lavra de acordo com a geometria do corpo mineralizado, com a escolha das dimensões dos realces de 25 m de largura, 20 de altura e espessura variando entre 5 e 50 m, otimização via Mineable Shapes Optimizer (MSO), desenho dos acessos e sequenciamento da mina, ajustado conforme metas de produção. Para avaliar o impacto das metas de desenvolvimento e de produção no indicador estudado, foram realizados cenários variando a produção de minério entre 15 e 50 kt/mês e metragem de desenvolvimento entre 150 e 60 m/mês. A reserva liberada foi bastante sensível a estas premissas, variando entre 100 e 400 kt/mês nos diferentes cenários. As maiores metas de desenvolvimento e menores metas de lavra resultavam em reservas liberadas maiores e vice-versa, uma tendência esperada, mas fundamental para o planejamento eficiente da mina. O trabalho oferece contribuições sobre como a otimização de parâmetros de sequenciamento pode influenciar a disponibilidade de reservas, contribuindo para uma gestão mais eficiente dos recursos ao longo do ciclo de vida da mina.

**Palavras-chave:** Mineração Subterrânea. *Sublevel Stopping*. Geometria de Escavações. Sequenciamento. Indicadores de Sustentabilidade de Reserva.

CANHOTO, João Antonio Amorim. **SUSTAINABILITY OF THE RESERVE IN LONG-TERM SEQUENCING**. 2024. 64. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

## **Abstract**

This study addresses the application of reserve indicators in the long-term planning of an underground polymetallic mine (gold, copper, silver, and cobalt). Focusing on the indicators of developed, accessed, and released reserves for mining, the study explores the relationship of these parameters with the operation's strategic planning. The adopted methodology includes defining the mining method according to the geometry of the mineralized body, with stope dimensions of 25 m in width, 20 m in height, and thickness varying from 5 to 50 m, optimization via Mineable Shapes Optimizer (MSO), design of access, and mine sequencing, adjusted according to production targets. To assess the impact of development and production targets on the studied indicator, scenarios were created, varying ore production from 15 to 50 kt/month and development footage from 150 to 60 m/month. Released reserves were highly sensitive to these assumptions, ranging from 100 to 400 kt/month across different scenarios. Higher development targets and lower mining targets resulted in higher released reserves and vice versa, a predictable trend but essential for efficient mine planning. The study offers insights into how sequencing parameter optimization can influence reserve availability, contributing to more efficient resource management throughout the mine's life cycle.

**Key words:** Underground Mining. Sublevel Stopping. Excavation Geometries Sequencing. Reserve Sustainability Indicators.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: LAYOUT DIDÁTICO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA. ....	14
FIGURA 2: DIAGRAMA DE HARTMAN PARA SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA. ....	19
FIGURA 3: BLOCO DE MINÉRIO COM DIMENSÕES L, C E H. ....	19
FIGURA 4: <i>SUBLEVEL STOPING</i> . ....	20
FIGURA 5: LUSTRAÇÃO DA PROPORÇÃO ENTRE DIMENSÕES ESTÁVEIS DAS ESCAVAÇÕES. ....	25
FIGURA 6: IMPACTO DA GEOMETRIA DO CORPO MINERAL NA ESCOLHA DA CONFIGURAÇÃO DOS REALCES. ....	27
FIGURA 7: RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS EXPLORAÇÕES, RECURSOS MINERAIS E RESERVAS MINERAIS. ....	29
FIGURA 8: REACOMODAÇÃO DE TENSÕES NO MACIÇO ROCHOSO DURANTE O DESENVOLVIMENTO DAS ESCAVAÇÕES. ....	30
FIGURA 9: DIMENSÕES U E V FIXAS E DIMENSÃO W OTIMIZADA (VARIÁVEL). ....	33
FIGURA 10: REALCES AINDA NÃO ALCANÇADOS PELAS GALERIAS. ....	34
FIGURA 11: REALCES ALCANÇADOS PELA GALERIA DE ACESSO, RESERVA ACESSADA. ....	35
FIGURA 12: <i>OREDRIVE</i> EM DESENVOLVIMENTO, RESERVA DESENVOLVIDA ONDE A <i>OREDRIVE</i> CHEGOU. ....	35
FIGURA 13: <i>OREDRIVE</i> FINALIZADA, RESERVA LIBERADA. ....	35
FIGURA 14: LAYOUT GERAL DOS ACESSOS DA MINA EM VISTA PERSPECTIVA. ....	42
FIGURA 15: DEPENDÊNCIAS DO FINAL DA GALERIA DE ACESSO PARA A RESERVA ACESSADA. ....	43
FIGURA 16: DEPENDÊNCIAS PARTINDO DA <i>OREDRIVE</i> PARA A RESERVA DESENVOLVIDA. ....	43
FIGURA 17: DEPENDÊNCIAS DO FINAL DA <i>OREDRIVE</i> INICIANDO A RESERVA LIBERADA. ....	43
FIGURA 18: MODELO DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE E SUAS DEPENDÊNCIAS. ....	44
FIGURA 19: DEPENDÊNCIAS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DA RESERVA NA MINA ESTUDADA. ....	44
FIGURA 20: DIMENSÕES DO MODELO DE BLOCOS. ....	46
FIGURA 21: PERDAS DE MINÉRIO AO LONGO DO PROCESSO. ....	47
FIGURA 22: PERDAS DE METAL - OURO. ....	47
FIGURA 23: PERDAS DE METAL - PRATA. ....	48
FIGURA 24: PERDAS DE METAL – COBRE. ....	48
FIGURA 25: PERDAS DE METAL - COBALTO. ....	49
FIGURA 26: SUSTENTABILIDADE DA RESERVA LIBERADA. ....	51
FIGURA 27: TEMPO DE MINA DE CADA CENÁRIO. ....	52
FIGURA 28: ROM/DESENVOLVIMENTO PARA CADA CENÁRIO. ....	52
FIGURA 29: VPL DE CADA CENÁRIO. ....	53
FIGURA 30: MOVIMENTAÇÃO DE MINÉRIO. ....	55
FIGURA 31: DISTRIBUIÇÃO DO DAS ATIVIDADES DO DESENVOLVIMENTO. ....	55
FIGURA 32: ROM/DESENVOLVIMENTO. ....	56
FIGURA 33: VPL ACUMULADO. ....	57
FIGURA 34: DISTRIBUIÇÃO DE TEOR. ....	58
FIGURA 35: DISTRIBUIÇÃO DE MASSA DA RESERVA ACESSADA. ....	58
FIGURA 36: DISTRIBUIÇÃO DE MASSA DA RESERVA DESENVOLVIDA. ....	59
FIGURA 37: DISTRIBUIÇÃO DE MASSA DA RESERVA LIBERADA. ....	59

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CORRELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE LAVRA PARA OS DIFERENTES TIPOS DE DEPÓSITOS E SUAS CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS E GEOMÉTRICAS.....	17
TABELA 2: RECEITAS E CUSTOS UTILIZADOS PARA CÁLCULO DA FUNÇÃO BENEFÍCIO E <i>CUT OFF VALUE</i> .....	39
TABELA 3: PARÂMETROS DOS ACESSOS.....	41
TABELA 4: PREMISSAS DO SEQUENCIAMENTO.....	45
TABELA 5: METAS DO SEQUENCIAMENTO.....	45
TABELA 6: RESUMO DO MODELO DE BLOCOS POR RECURSO.....	46
TABELA 7: DADOS DOS CENÁRIOS SEQUENCIADOS.....	50
TABELA 8: CENÁRIO SELECIONADO PARA NOVO SEQUENCIAMENTO.....	53
TABELA 9: DADOS DO NOVO SEQUENCIAMENTO DO CENÁRIO SELECIONADO.....	59

# SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1.	MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA.....	13
2.1.1.	<i>Métodos de Lavra Subterrânea.....</i>	<i>17</i>
2.2.	PLANEJAMENTO DE MINA SUBTERRÂNEA .....	22
2.2.1.	<i>Geometria das Escavações .....</i>	<i>24</i>
2.3.	RECURSO E RESERVA.....	27
2.4.	SEQUENCIAMENTO CURTO E LONGO PRAZO.....	29
2.5.	INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DE RESERVA.....	33
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1.	DESENHO DOS ACESSOS .....	40
3.2.	DEPENDÊNCIAS DAS RESERVAS .....	43
3.3.	SEQUENCIAMENTO DA MINA .....	44
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
4.1.	ANÁLISE DO CENÁRIO DO SEQUENCIADO .....	54
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.....</b>	<b>62</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Independentemente do ambiente de lavra, seja a céu aberto ou subterrâneo, a indústria da mineração compartilha objetivos fundamentais. A extração segura dos materiais de interesse, a minimização dos impactos ambientais, a maximização do retorno financeiro e o aproveitamento responsável das reservas, são alguns deles.

No contexto de planejamento de mina, é crucial considerar alguns fatores complexos, muitas vezes com interesses conflitantes. Isso inclui aspectos econômicos como taxa de retorno, produção e rentabilidade de escavações específicas, assim como questões relacionadas ao sequenciamento de atividades. O desafio consiste em equilibrar a maximização dos lucros com a garantia da estabilidade do maciço rochoso. Embora a otimização das operações permaneça como um desafio contínuo, é possível buscar a otimização de cada etapa individualmente, com o objetivo de alcançar o melhor resultado global possível.

Para o planejamento, a metodologia de simulação de cenários distintos é crucial para aprimorar a rentabilidade dos ativos da mineração. Nesse contexto, este estudo propõe a adoção de ferramentas de planejamento de lavra para estudar o sequenciamento utilizando como meta, além de ROM, teor e metragem, mas correlacionando com indicadores de sustentabilidade de reserva, visando estabilidade da reserva liberada. O objetivo é fornecer suporte à tomada de decisões mais embasadas, visando uma integração mais eficiente do planejamento com a operação.

Neste propósito, foram analisados os cenários de sequenciamento em um depósito mineral subvertical polimetálico fictício, método de lavra *Sublevel Stopping*, dimensões dos realces de 20 m de altura por 25 m de largura e pilares verticais (*rib pillars*) e horizontais (*sill pillars*) com 5 m.

Outro aspecto muito importante é a escolha do método lavra utilizado, pois tem grande impacto no sequenciamento, produtividades, fatores de risco e econômicos do projeto. Se esta escolha for mal executada, o sequenciamento destas operações pode se tornar um problema ainda mais complexo, colocando

em risco todo o empreendimento. Os engenheiros de planejamento de mina enfrentam a tarefa complexa de escolher o método de lavra mais adequado, levando em conta uma série de fatores e parâmetros cruciais. Devem ser analisados aspectos geotécnicos e geomecânicos, o valor econômico do minério, questões relacionadas ao processamento e ao descarte de rejeitos, além das condições de mercado para a venda do minério e os indicadores econômicos que influenciam a viabilidade do projeto.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica para este estudo abordou os seguintes temas: (i) Mineração Subterrânea; (ii) Planejamento de Mina Subterrânea; (iii) Recurso e Reserva; (iv) Sequenciamento Curto e Longo Prazo; (v) Indicadores de Sustentabilidade de Reserva

### 2.1. Mineração subterrânea

A atividade mineradora desempenha um papel fundamental na sociedade, exercendo influência sobre a evolução dos mercados globais de *commodities*, atraindo investimentos, gerando riqueza e suprindo as demandas da população mundial moderna. No entanto, a mineração é uma atividade complexa que envolve uma interação delicada entre economia e meio ambiente. O trabalho do engenheiro de minas é crucial nesse assunto, pois busca tornar o projeto atrativo para investidores, garantindo assim os recursos necessários para sua execução, enquanto mantém um compromisso constante com a preservação ambiental e o bem comum.

Os métodos de lavra subterrânea em grande parte apresentam custos unitários mais elevados em comparação com os métodos a céu aberto, por este motivo a lavra a céu aberto é, por vezes, mais atrativa sendo necessária uma reserva mineral de alto valor econômico para justificar a execução do projeto subterrâneo. Contudo, a lavra subterrânea tem menor impacto ao meio ambiente, e devido à contínua evolução tecnológica, os métodos subterrâneos estão se tornando mais acessíveis e seguros.

O *layout* geral de uma mina subterrânea para corpos verticalizados é apresentada na Figura 1.



o propósito de transportar material de um nível mais elevado para um inferior;

- *Ramp* (Rampa) – Desenvolvimento subterrâneo utilizado para a passagem de veículos e, muitas vezes, como rota de transporte do minério;
- *Level* (Nível) – Desenvolvimento ou lavra subterrâneas realizadas entre determinadas cotas;
- *Sublevel* (Subnível) – Subdivisão dos níveis dos painéis e realces;
- *Crosscut* (Travessa) – Desenvolvimento horizontal utilizado para alcançar o corpo de minério;
- *Hangingwall* (Capa) – Rocha encaixante acima do corpo mineral;
- *Footwall* (Lapa) – Rocha encaixante abaixo do corpo mineral;
- *Dip* (Mergulho) – Inclinação do corpo mineral em relação à horizontal.

Ao analisar o método mais apropriado para a lavra de um depósito subterrâneo, várias considerações devem ser levadas em conta. Muitas dessas variáveis estão relacionadas ao corpo de minério e suas características geomecânicas, econômicas, entre outras. Algumas delas incluem:

- Espessura do depósito;
- Resistência do minério;
- Resistência da rocha hospedeira;
- Uniformidade do minério;
- Profundidade do depósito;
- Forma;
- Teor;
- Inclinação.

Outras particularidades estão relacionadas ao método de extração mineral:

- Investimento inicial e cronograma de implantação;
- Taxa de produção;

- Despesas operacionais;
- Seletividade e flexibilidade;
- Metodologia para extração do minério;
- Dimensões das escavações;
- Método de transporte;
- Sequenciamento das operações;
- Automatização.

Nicholas (1992) e Brady e Brown (2004) exploram uma relação abrangente entre os métodos de lavra potenciais e as características geométricas e geomecânicas do maciço rochoso em análise. A Tabela 1 apresenta uma correlação entre diferentes geometrias de corpos minerais e os métodos de lavra indicados, além de suas respectivas características técnicas e econômicas.

Tabela 1: Correlação entre os métodos de lavra para os diferentes tipos de depósitos e suas características econômicas e geométricas.

<b>Método de Lavra</b>	<b>Geometria do Corpo Mineral</b>		<b>Características Técnicoeconômicas</b>
<b>Métodos por Abatimento</b>	Mergulho Típico	<b>Geometria Típica</b>	<b>Baixo Custo de Operação</b>
<i>Block Caving</i>	Vertical a Subvertical	Massivo a Pipe	Alta Produtividade
<i>Sublevel Caving</i>	Vertical a Subvertical	Massivo a Lenticular	Baixa Seletividade
<i>Core and Shell</i>	Vertical a Subvertical	Massivo a Lenticular	
<b>Métodos por Realces</b>			
<i>Sublevel Open Stopping</i>	Vertical a Subvertical	Massivo a Lenticular	
<i>Longhole Open Stopping</i>	Vertical a Moderado	Lenticular a Tabular	
<i>Avoca</i>	Vertical a Moderado	Tabular a Veios Estreitos	
<i>Shrinkage</i>	Vertical a Moderado	Tabular a Veios Estreitos	
<b>Métodos por Desenvolvimento</b>			
<i>Room and Pillar</i>	Horizontal a Sub-horizontal	Lenticular a Tabular	
<i>Post Pillar Cut and Fill</i>	Sub-horizontal a Moderado	Lenticular a Tabular	Alto Custo de Operação
<i>Mechanized Cut and Fill</i>	Horizontal a Vertical	Lenticular a Veios Estreitos	Baixa Produtividade
<i>Drift and Fill</i>	Horizontal a Vertical	Lenticular a Veios Estreitos	Alta Seletividade

Fonte: Datamine (201?).

### 2.1.1. Métodos de Lavra Subterrânea

Os métodos de lavra subterrânea podem ser divididos em três classes amplas: *caving*, *stopping* e outros métodos. O termo *caving* implica o colapso controlado da massa de rocha sob a força da gravidade, enquanto o termo *stopping* implica a escavação de uma abertura estável de pequenas ou grandes dimensões.

As tecnologias de *block caving* são especialmente adequadas para a exploração de grandes depósitos de minério de baixo teor, permitindo o colapso controlado da massa rochosa. Nesse processo, o material fragmentado é

extraído por meio de um sistema de recuperação automatizado. Por outro lado, as tecnologias de *sublevel caving* são indicadas para depósitos minerais de geometria predominantemente tabular, exigindo um método de lavra mais seletivo. Nesse contexto, a extração é realizada através de métodos convencionais de perfuração e detonação, que proporcionam maior precisão na recuperação do minério.

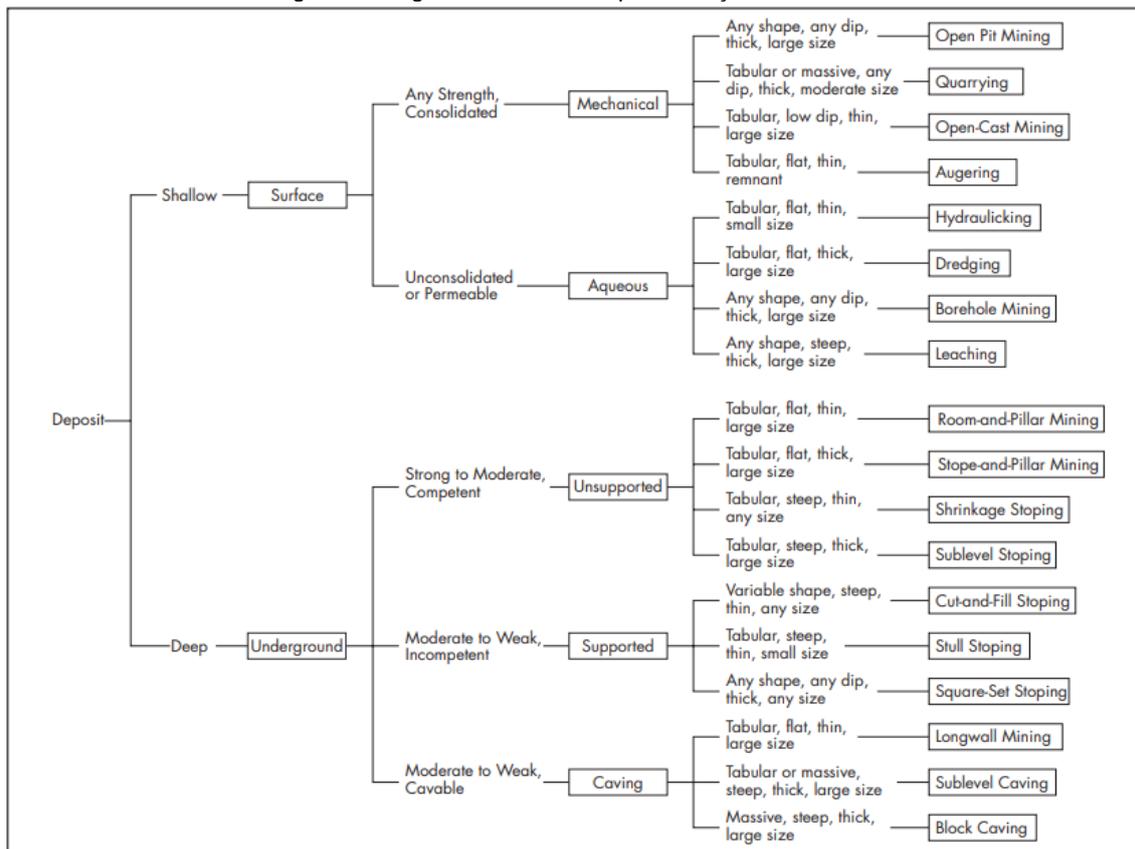
Os métodos *stoping* se caracterizam pela escavação de realces em variadas dimensões, cujas especificidades são determinadas pelo tipo de mineralização e pelas propriedades geomecânicas do maciço e da rocha hospedeira.

Outro aspecto que define os possíveis métodos de lavra por realce é o uso de enchimento, geralmente dividido em duas categorias principais: (1) enchimento com rocha estéril ou rejeitos, que podem ser não consolidados, oferecendo baixa resistência; e (2) enchimento consolidado, feito com materiais como cimento ou cinzas volantes. Nesse contexto, "resistência" refere-se à capacidade do material de enchimento de permanecer estável, sem colapsar, quando a rocha confinante é removida em uma etapa subsequente da lavra.

Uma terceira característica que define os métodos de lavra por realce é a tecnologia de perfuração e desmonte empregada, a qual pode envolver sistemas de furos curtos ou longos. Neste contexto, furos curtos, com menos de 4 metros de comprimento, são geralmente executados com jumbos de perfuração, enquanto furos longos são realizados com equipamentos de perfuração específicos para este fim. (Peter G. Carter, 2011)

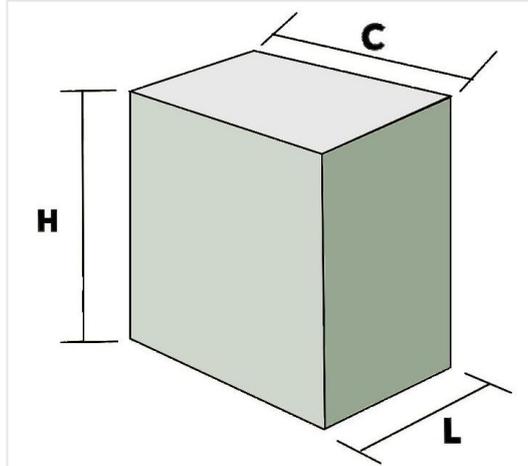
A literatura, geralmente simplificada, auxilia nos estudos e compreensão dos métodos de lavra, contudo, a natureza muitas vezes por meio de várias iterações geológicas acaba deixando o depósito com um certo nível de complexibilidade, exigindo que o engenheiro de minas utilize métodos de lavra inovadores, incluindo a combinação de métodos de lavra. Como um ponto de partida, o diagrama de Hartman, 1987 relaciona características do corpo mineral com o método de lavra mais adequado, ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Diagrama de Hartman para seleção do método de lavra.



Fonte: Hartman (1987).

Para uma melhor compreensão dos métodos subterrâneos, a Figura 3 ilustra um bloco de minério com largura  $L$ , comprimento  $C$  e altura  $H$ . Este bloco pode ser recuperado utilizando uma variedade de métodos de extração subterrânea.

Figura 3: Bloco de minério com dimensões  $L$ ,  $C$  e  $H$ .

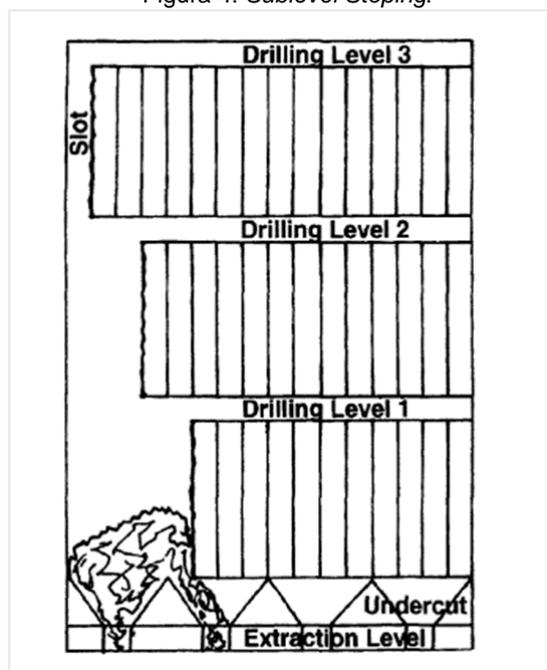
Fonte: Autor (2024).

O planejamento do método de extração apropriado deve envolver uma análise cuidadosas. Em geral, os métodos de mineração subterrânea baseiam-se na gravidade como princípio de operação, com o acesso ao minério realizado por meio de galerias, que após a detonação, o minério fragmentado será direcionado para o fundo e posteriormente removido por carregadeiras *Load Haul Dump (LHD)*.

### Sublevel Stoping

Para o método de *Sublevel Stoping*, considere que o bloco mostrado na Figura 3 está empilhado e será sujeito à lavra por subníveis Figura 4. Se as análises geomecânicas indicarem que os realces podem ser extraídos usando o mesmo nível/painel de extração, então múltiplos níveis de perfuração em várias alturas podem ser estabelecidos. Uma extração considerada mais segura é de forma ascendente (de baixo para cima), onde a extração dos blocos inferiores precede os superiores, e em recuo, com a lavra começando das bordas para o centro.

Figura 4: *Sublevel Stoping*.



Fonte: *Underground Mining Methods* (2001).

O método *Sublevel Stoping* é conhecido por sua alta produtividade, baixa diluição e versatilidade, sendo aplicado em grandes corpos minerais verticalizados, com limites bem definidos e distribuição uniforme, em rochas

estáveis tanto no *hangingwall* quanto no *footwall*, além de minério e rochas encaixantes mais resistentes à variação mecânica das forças preexistentes no maciço. Existem diversas variações do método, cada uma adaptada para diferentes cenários. Entre essas variações destacam-se o *sublevel open stoping*, *bighole stoping*, *vertical crater retreat (VCR)*, *vertical retreat mining (VRM)*, *alimak*, *avoca* e *sublevel stoping transversal*. (HUSTRULID e BULLUCK, 2001; DARLING, 2011).

Alguns dos termos mais comuns utilizados no *Sublevel Stopping* são listados abaixo:

- *Rib Pillar* – Pilar vertical que separa realces ou painéis de mesmo nível. Tem como objetivo evitar o colapso das rochas do *footwall* e do *hangingwall*, garantindo a estabilidade durante o processo de extração do minério.;
- *Sill Pillar* – Pilar horizontal que separa realces ou painéis de níveis diferentes. Tem como objetivo evitar o colapso do *footwall* e *hangingwall*;
- *Longitudinal Pillar* – Pilar Vertical que separa realces paralelos. Tem como objetivo evitar o colapso do teto do realce;
- *Stope Span* (largura do realce) – Vão horizontal máximo entre dois pilares tolerado pelo maciço;
- *Height* (altura) – Aplica-se tanto aos pilares quanto aos realces;
- *Width* (espessura ou potência) – Se aplica tanto aos pilares quanto aos realces;
- Diluição Planejada - Material que também deve ser extraído devido à geometria irregular do corpo de minério presente nos realces com formato retangular;
- Diluição não planejada ou operacional – Diluição causada pelo deslocamento das paredes dos realces. O material contido nesta diluição está fora dos limites dos realces planejados.

A aplicação da lavra por subníveis pressupõe uma boa estabilidade dos realces. Falhas nesse aspecto podem levar ao colapso parcial ou total dos realces em produção, comprometendo a continuidade da lavra. Em casos

extremos, grandes blocos podem obstruir os pontos de extração, interrompendo as operações. Mesmo nas situações menos graves, ocorre perda de minério e aumento da diluição. O reforço do *hangingwall* e do *footwall* pode ser implementado antes ou durante a lavra. Esses blocos de extração podem ser orientados ao longo *strike* do corpo de minério (longitudinalmente) ou transversalmente.

No *Sublevel Stopping*, o minério é obtido de realces que, normalmente, são preenchidos após minerados possibilitando a recuperação do minério contido nos pilares deixados entre os realces. O aumento das dimensões dos realces resulta em uma maior produtividade, eficiência e redução de custos operacionais e de desenvolvimento, contudo, também aumenta a instabilidade local e global do maciço rochoso. Por esta razão, o dimensionamento dos realces e pilares é, sobretudo, limitado pela mecânica de rochas do maciço (HUSTRULID e BULLUCK, 2001; BRADY e BROWN, 2004; DARLING, 2011; VILLAESCUSA, 2014;).

## **2.2. Planejamento de mina subterrânea**

Uma vez delimitados e estimados os recursos minerais, é necessário definir o método de lavra utilizado para o aproveitamento do recurso. Neste estágio, a seleção é preliminar, servindo como base para os estudos de pré viabilidade. Posteriormente é necessário revisar o projeto, porém os princípios básicos definidos devem se manter no plano de aproveitamento final (HUSTRULID e BULLOCK, 2001).

Os primeiros passos durante o planejamento é reunir o máximo de informações geológicas, estruturais e mineralógicas possíveis, essa será a base de todo o trabalho. Posteriormente, projeta-se e sequencia-se a mina de acordo com as estratégias estabelecidas e realiza-se o dimensionamento de equipamentos e pessoal para atender as demandas projetadas.

O principal objetivo ao decidir e planejar um método de lavra deve ser maximizar o valor, pois o empreendimento além de lucrativo deve ser atrativo para posteriores investimentos, o que é alcançado após consideração dos seguintes aspectos:

- Máxima produtividade
- Qualidade e quantidade exigidas do produto
- Máxima recuperação das reservas
- Menor custo de produção por tonelada
- Segurança de todo o pessoal

Durante esse processo, uma análise econômica abrangente de vários possíveis cenários de mina é realizada. No entanto, o planejamento é um processo iterativo que está em constante revisão e aprimoramento. À medida que a mina amadurece, informações adicionais sobre as condições geológicas, demandas do mercado e capacidades operacionais tornam-se mais precisas, permitindo ajustes estratégicos. Este refinamento contínuo permite que o planejamento responda de forma dinâmica a novos desafios, garantindo que as metas de produção sejam alcançadas de maneira eficiente e com menor risco. Assim, o planejamento se adapta progressivamente, integrando conhecimento atualizado que dão suporte a decisões mais eficazes a longo prazo.

Investir em planejamento e *design* antes da implementação do projeto é fundamental para garantir a sua eficácia. Esse processo deve seguir um plano rigoroso, incorporando contingências e flexibilidade adequadas para lidar com a inevitável variabilidade encontrada durante a implementação.

Uma série de desafios surgem ao tentar otimizar a produção em uma mina, muitos dos quais estão intrinsecamente ligados ao impacto do Valor Presente Líquido (VPL). Quando se observa apenas o aspecto financeiro, é comum que a otimização que oferece o maior retorno seja a escolha preferida.

Projetos que buscam maximizar o VPL podem adotar abordagens mais agressivas, adiando determinados custos que, se antecipados, poderiam proporcionar maior segurança às operações. Um exemplo disso é o adiantamento do desenvolvimento dos níveis para garantir maior volume de reserva exposta, o que, embora eleve o custo inicial, pode aumentar a flexibilidade operacional no futuro.

No entanto, a utilização de mais frentes de desenvolvimento, embora implique custos adicionais e redução do VPL, pode ser crucial para manter várias

frentes de lavra operando simultaneamente, o que assegura uma maior continuidade e estabilidade na produção. Além disso, com o desenvolvimento de mais níveis, é possível reduzir a diluição dos realces, o que contribui para uma lavra mais eficiente. Dessa forma, a estratégia de desenvolvimento deve ser balanceada entre a maximização do VPL e a flexibilidade e eficiência operacional.

O planejamento é a fase do projeto da mina que abrange a sustentabilidade global do empreendimento, incluindo a operacionalidade, a viabilidade econômica e a viabilidade técnica das atividades propostas. Esse estudo antecede a extração efetiva do material e é continuamente aprimorado conforme a mina avança e novas informações são adquiridas. Por meio do planejamento, obtêm-se dados cruciais como os recursos necessários e o material a ser extraído em momentos específicos, de modo a cumprir as quantidades e qualidades estratégicas estabelecidas pelo projeto. Além disso, identifica-se quais atividades auxiliares são essenciais para garantir uma exploração sustentável, como ventilação, bombeamento, fornecimento de energia, preenchimento dos realces etc.

Pode-se dividir o planejamento de acordo com horizontes temporais que variam de empreendimento para empreendimento, quais sejam, longo prazo, médio prazo e curto prazo. O planejamento de longo prazo, contém informações da mina ao longo de sua vida útil de forma global; o planejamento de médio prazo é o planejamento intermediário entre os horizontes longo e curto prazo; e o planejamento de curto prazo engloba informações mais detalhadas que são pertinentes ao dia a dia da mina, ficando com maior interface com a operação.

### **2.2.1. Geometria das Escavações**

As instalações subterrâneas, como transformadores, estações de energia e transferência, estações de bombeamento, oficinas, depósitos de armazenamento, estações de carregamento, câmaras de refúgio, oficinas de manutenção etc., exercem influência significativa sobre o *design* e o estudo de engenharia no projeto.

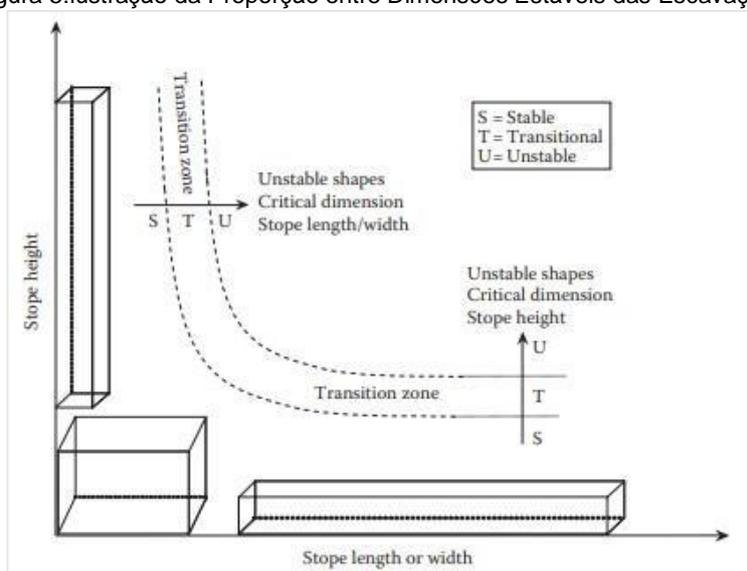
Depois que uma taxa de produção inicial é determinada, os engenheiros de planejamento podem usá-la em conjunto com as distâncias médias de

transporte para estimar as capacidades das máquinas usadas para coletar minério nos realces, transportá-lo através das galerias, e finalmente levá-lo (por meio de uma rampa ou poço) até a superfície. As alturas e larguras dessas máquinas (caminhões basculantes ou fora de estrada, carregadeiras, vagões ferroviários, transportadores etc.) fornecem a base para as seções transversais de todas as aberturas pelas quais elas devem passar. (Scott A. Stebbins, 2011)

Além disso, o planejamento de lavra deve cumprir com as determinações da geotecnia e a partir de então buscar um cenário ótimo de extração. Para garantir sua conformidade, os sólidos de lavra e sequenciamento projetados devem ser validados posteriormente com a equipe de geotécnicos da mina.

Devido às limitações de suporte a serem dados as paredes das escavações, estas devem ser projetadas de forma a serem naturalmente estáveis. Observa-se que escavações com dimensões verticais inversamente proporcionais as dimensões horizontais tendem a apresentar maior estabilidade. Exemplos claros que mostram essa tendência de estabilidade são galerias horizontais (grande comprimento e altura reduzida) e poços verticais (grande altura e largura reduzida) (DARLING, 2011; VILLAESCUSA, 2014). A Figura 5 ilustra um diagrama prático entre a relação da altura e largura em escavações subterrâneas.

Figura 5: Ilustração da Proporção entre Dimensões Estáveis das Escavações.



Fonte: Villaescusa (2014).

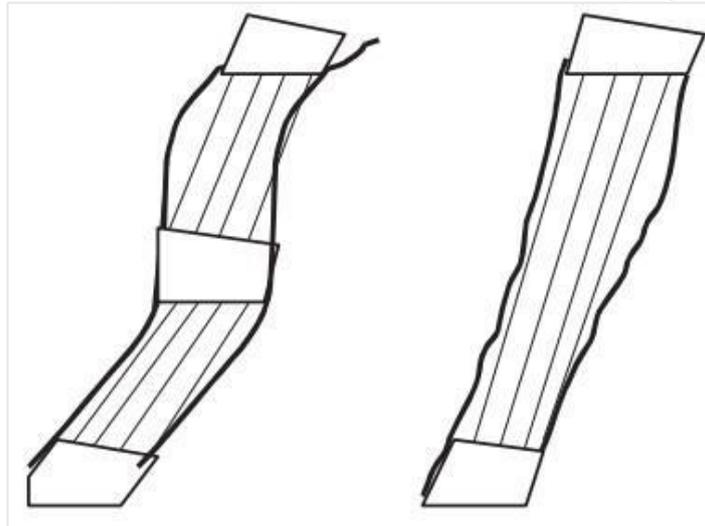
É importante destacar que a estabilidade das escavações é avaliada com base no grau de deslocamento das suas paredes, e não necessariamente no colapso total. A distinção entre estabilidade e instabilidade dos realces, conforme a intensidade desses deslocamentos, é um critério definido internamente por cada mina, de acordo com suas estratégias e conhecimento sobre o maciço trabalhado. Portanto, não há um valor fixo que determine a estabilidade de um determinado vão.

Segundo Villaescusa (2014), diversos estudos evidenciam uma correlação entre a geometria dos realces e o nível de colapso associado. No entanto, há pesquisas que indicam que a redução das dimensões dos realces não garante, uma maior estabilidade das escavações. Portanto, é essencial realizar uma análise detalhada da performance dos realces para validar essas conclusões no contexto do maciço específico da mina em questão.

O dimensionamento das escavações está profundamente relacionado a fatores geomecânicos, mas não se limita a esses aspectos. Outros elementos também influenciam a definição das geometrias das aberturas. Por exemplo, o espaçamento entre subníveis é determinado por considerações econômicas, visando maximizar o lucro por tonelada de minério, e é restringido pelas capacidades dos equipamentos de perfuração disponíveis. (DARLING, 2011; VILLAESCUSA, 2014).

Entre os fatores considerados estão os custos associados ao desenvolvimento e a lavra, bem como a diluição e a seletividade devido às irregularidades no corpo mineral. Como mostra a Figura 6, corpos minerais com formas mais regulares permitem a utilização de realces maiores sem que se observe um aumento significativo na diluição ou uma redução na seletividade. (VILLAESCUSA, 2014).

Figura 6: Impacto da geometria do corpo mineral na escolha da configuração dos realces.



Fonte: Villaescusa (2014).

### 2.3. Recurso e Reserva

O valor principal de uma mina é determinado pela sua reserva potencial de minério. O termo "potencial" é empregado porque, frequentemente, a extensão completa e a qualidade de um corpo mineral não são totalmente conhecidas até que seja realizada uma exploração completa. Uma das decisões críticas que o desenvolvedor deve tomar antes da construção da mina é o grau de certeza necessário sobre o tamanho, qualidade e configuração do corpo mineral antes de comprometer os recursos financeiros. (Peter Darling, 2011).

O conhecimento sobre tipos de rochas e estruturas similares em minas já estabelecidas é sempre valioso. A primeira mina em um novo distrito tem uma maior probabilidade de cometer erros que podem custar o fechamento da mina durante seu desenvolvimento em comparação com minas desenvolvidas posteriormente.

Os recursos minerais são classificados em três categorias principais com base no nível de confiança nas informações geológicas: inferidos, indicados e medidos. Recursos inferidos são estimados com base em evidências geológicas limitadas e têm o menor nível de confiança, não podendo ser convertidos diretamente em reservas minerais. Com o aprimoramento do conhecimento geológico, esses recursos podem ser reclassificados como indicados ou medidos. Recursos indicados, por sua vez, possuem maior confiança, baseada

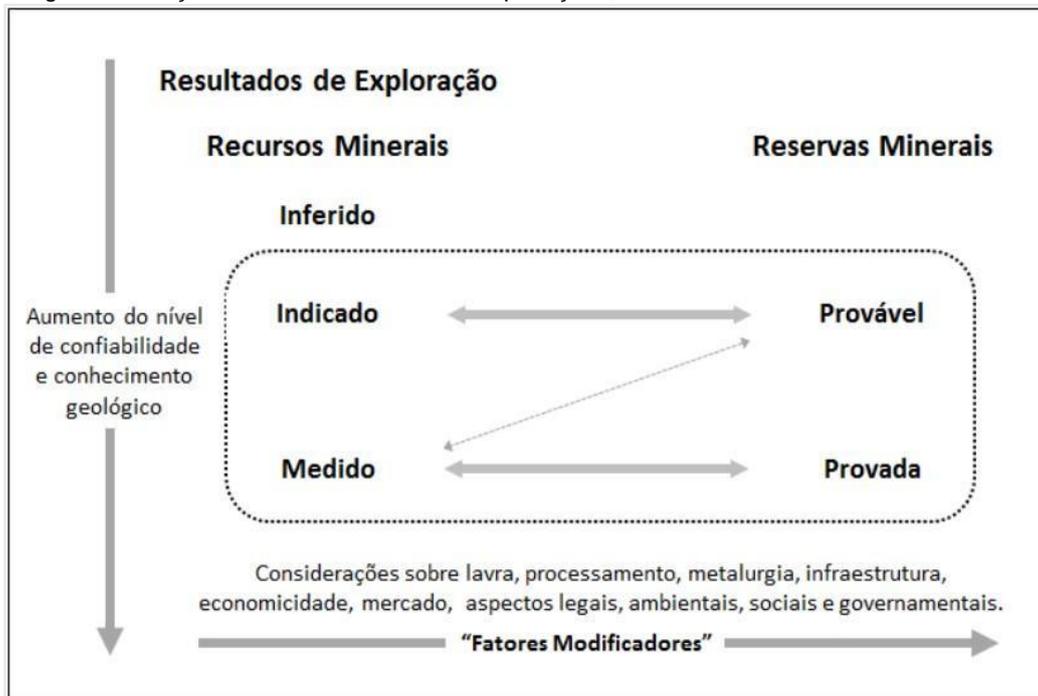
em dados obtidos através de exploração e amostragem suficientes para sugerir continuidade geológica, sendo passíveis de conversão em reservas prováveis. Já os recursos medidos apresentam o mais alto nível de confiança, com evidências geológicas detalhadas e confiáveis, permitindo sua conversão em reservas provadas ou prováveis, dependendo da avaliação de fatores modificadores externos (JORC, 2012).

De acordo com o código JORC (2012), uma reserva mineral é definida como a parte de um recurso mineral que é economicamente viável para extração. Essa definição inclui aspectos como diluição e perdas do minério durante a lavra e é baseada em estudos de préviabilidade ou viabilidade, que envolvem a aplicação de fatores modificadores (como considerações técnicas, econômicas, sociais, ambientais, legais e políticas) para converter recursos em reservas. As reservas minerais são classificadas conforme o grau de conhecimento sobre esses fatores modificadores, sendo categorizadas como prováveis ou provadas.

A reserva mineral provável refere-se à porção de um recurso mineral indicado e/ou medido que apresenta viabilidade econômica para extração, embora com menor confiança na aplicação dos fatores modificadores em comparação com uma reserva mineral provada. Já a reserva mineral provada, que é derivada exclusivamente de recursos medidos, indica um nível mais alto de certeza sobre os fatores modificadores, assegurando maior confiabilidade na viabilidade econômica da extração (JORC, 2012).

A Figura 7 ilustra a progressão dos recursos e reservas e as interfaces para suas conversões. À medida que o conhecimento sobre um depósito mineral avança, ele pode evoluir de recurso inferido para indicado e, posteriormente, de indicado para medido. Com a aplicação dos fatores modificadores externos, um recurso mineral indicado pode ser convertido em reserva mineral provável, enquanto um recurso mineral medido pode ser transformado tanto em reserva mineral provável quanto em reserva mineral provada. No entanto, se os fatores modificadores externos se tornarem desfavoráveis, uma reserva mineral pode ser reclassificada como recurso mineral (JORC, 2012).

Figura 7: Relação entre os resultados das explorações, recursos minerais e reservas minerais.



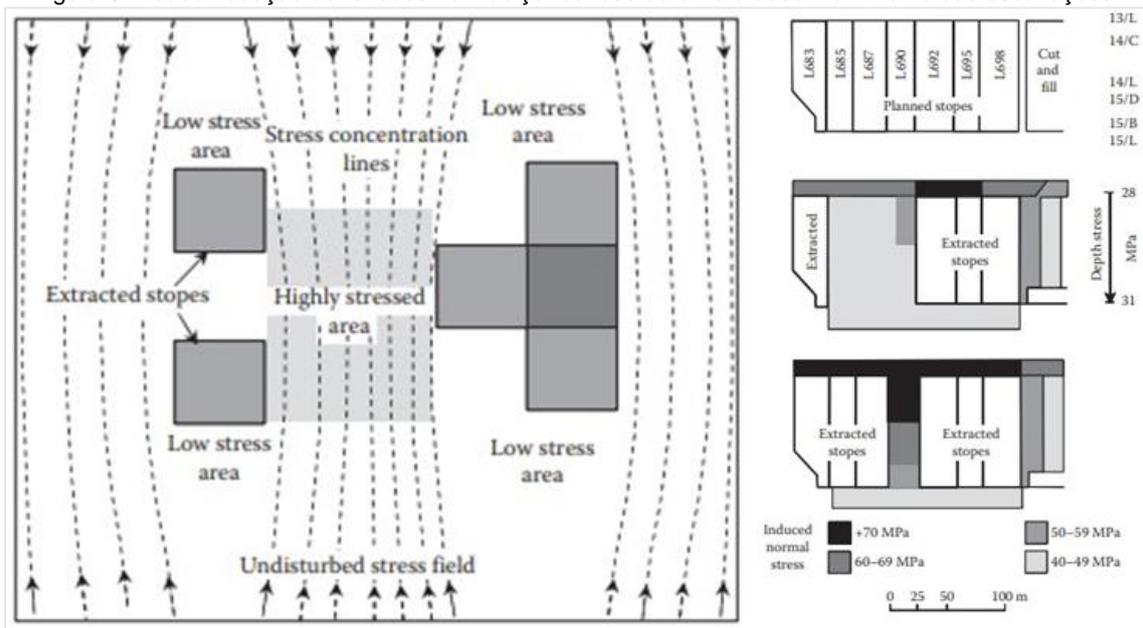
Fonte: CBRR (2016).

## 2.4. Sequenciamento Curto e Longo Prazo

A estabilidade das escavações está diretamente relacionada às atividades na mina, como desmontes em escavações próximas a realces preenchidos que estão em processo de cura e características geológicas, como descontinuidades. Com a lavra dos realces, os vãos na rocha causam uma redistribuição das tensões locais, afetando a integridade do maciço próximo às escavações. (HUSTRULID e BULLOCK, 2001; VILLAESCUSA, 2014).

A Figura 8 ilustra a redistribuição de tensões no maciço durante a extração dos realces. Em alguns casos, a reavaliação do sequenciamento das atividades pode ter um impacto maior na estabilidade do maciço do que a própria geometria do realce. De maneira geral, essa estabilidade aumenta quando os realces são sequenciados em direção a uma parte mais estável do maciço, como as extremidades do corpo de minério. (VILLAESCUSA, 2014).

Figura 8: Reacomodação de tensões no maciço rochoso durante o desenvolvimento das escavações.



Fontes: Villaescusa (2003) apud Villaescusa (2014) e Bywater et al., (1983) apud Villaescusa (2014).

O engenheiro de planejamento precisa levar em consideração a estabilidade do maciço bem com ter consciência que a sequência das atividades está diretamente ligada ao VPL da mina. O VPL é uma das técnicas mais comuns para análise de viabilidade de projetos e consiste na soma dos fluxos de caixa de cada período, descontados por uma taxa específica. Dessa forma, o VPL possibilita a comparação entre diferentes projetos, considerando o valor do dinheiro no tempo. Projetos com VPL mais elevado sugerem maior probabilidade de sucesso de investimento em comparação com projetos de VPL mais baixo.

Em resumo, quanto mais as despesas poderem ser adiadas, melhor. Em um modelo financeiro, a temporalidade de um custo de desenvolvimento deve ser examinada em uma análise de sensibilidade. Não é economicamente interessante para a mina adiantar custos com desenvolvimento não produtivo. Qualquer desenvolvimento que possa ser postergado até que um fluxo de caixa positivo seja alcançado, sem aumentar outros custos da mina, deve ser adiado. Contudo, adiar desenvolvimentos em uma mineração subterrânea, implica em menos frentes de lavra, o que deixa o planejamento menos flexível.

No planejamento a longo prazo, busca-se identificar o cenário ideal para a extração, estimar a quantidade de reservas viáveis e taxas de lavra que garantam a segurança e viabilidade das operações da mina. O objetivo nesta fase é

desenvolver o *layout* da mina, avaliar diferentes cenários e projetar os custos operacionais com o intuito de minimizar os custos, e maximizar o retorno econômico do projeto.

As considerações básicas no planejamento e desenvolvimento de vias de acesso e sistemas de produção estão diretamente relacionadas aos parâmetros de *design* das aberturas de desenvolvimento. Estes envolvem o fluxo de produção, inclinação, tamanho, arranjo e suporte. Cada abertura deve ser considerada no processo de fluxo de produção e deve ser planejada para ser compatível com os elementos de fluxo de ambos os lados.

Ao planejar uma nova mina, é necessário compreender o conceito de *design*, que além de estabilidade, busca otimizar o valor presente líquido ou alcançar a máxima taxa interna de retorno. Além disso, é crucial ter uma compreensão detalhada dos aspectos financeiros e da importância de manter altos níveis de produção a custos operacionais baixos ao longo do tempo. Sob o ponto de vista financeiro, a maximização da extração do depósito mineral geralmente resulta em maior rendimento, devido aos custos fixos associados à atividade mineradora e aos princípios de valor presente de qualquer investimento. No entanto, a maximização da produção é limitada por algumas razões práticas que também precisam ser avaliadas.

A fórmula desenvolvida por Taylor (Taylor, 1977) proporciona uma abordagem alternativa ou complementar para o dimensionamento de mina. Taylor formulou uma equação baseada em análise de regressão para estimar o tamanho de uma mina. A fórmula de Taylor propicia um ponto de partida valioso.

É essencial manter as flutuações de massa e teor dentro dos parâmetros máximos e mínimos planejados, seja em bases mensais ou anuais, independentemente da heterogeneidade da mina. Além da quantidade de minério disponível, o teor exerce significativa influência no planejamento e dimensionamento da mina. A ordem de exploração das diferentes níveis pode ter impacto relevante na viabilidade econômica, especialmente em minas de composição heterogênea.

A relação entre teor e tonelagem também é variável, exigindo ajustes para manter a operação economicamente viável. Por exemplo, reduzir o teor de corte pode aumentar o volume de minério extraído, mas essa decisão requer análise cuidadosa, pois deve ser equilibrada com a função benefício, que algumas vezes envolve cálculos complexos. Assim, o planejamento da lavra deve considerar tanto a estabilidade da massa de minério quanto as oscilações de teor, visando otimizar o rendimento e a sustentabilidade da operação a longo do tempo.

No primeiro projeto de planejamento longo prazo da mina, é fundamental para o engenheiro de minas de planejamento analisar variações relacionadas ao teor e à tonelagem, juntamente com os custos de lavra, para diferentes níveis. Deve-se avaliar quais cenários são viáveis e economicamente justificáveis para a reserva mineral.

Um dos primeiros passos no desenvolvimento de uma mina subterrânea é a definição dos realces ótimos, dado seu impacto direto na viabilidade econômica do projeto. Essa definição visa maximizar o lucro, considerando as limitações físicas, técnicas e econômicas. Diversos algoritmos foram propostos para otimizar os limites dos realces ao longo dos últimos anos. Erdogan et al. (2017) revisam e comparam a aplicabilidade e os resultados de vários desses métodos.

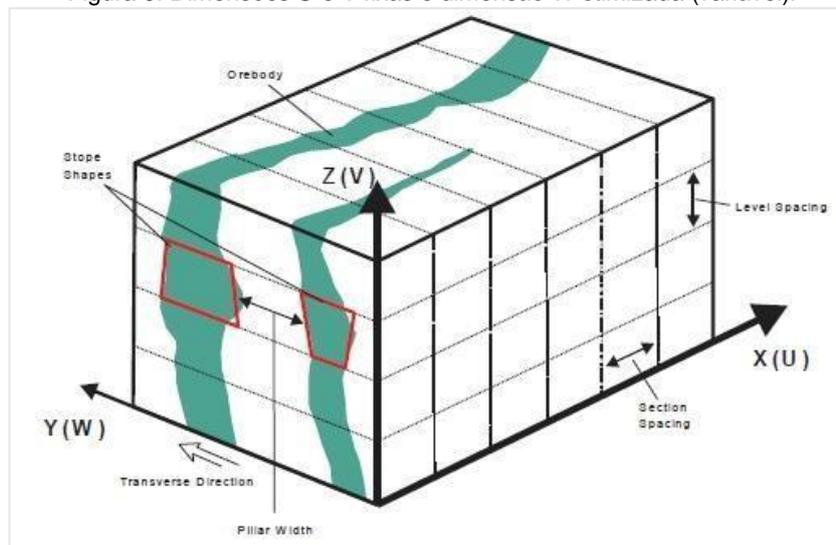
O algoritmo *Floating Stopes*, desenvolvido por Alford (1995), é utilizado em todo o mundo para a otimização de realces em corpos de minério tabulares. Este método, que não está atrelado a um tipo específico de lavra, compartilha uma lógica semelhante ao método de cones móveis (*moving cone method*) utilizado na otimização de cavas a céu aberto.

Para corpos tabulares verticalizados, o *MSO* pode ajustar alturas e larguras dos realces enquanto otimiza suas espessuras na direção horizontal (W). A otimização pode focar na maximização dos teores ou do metal contido, com a escolha entre maior valor financeiro ou maior reserva disponível.

O *MSO* gera *strings* representativas dos realces em seções dentro do limite de otimização e as une para formar sólidos, para então serem avaliados e ajustados com base em um modelo de blocos. Esse processo inclui a consideração de parâmetros operacionais como a largura mínima e máxima da

escavação, diluições previstas, e ângulos das paredes, entre outros ilustrados na Figura 9.

Figura 9: Dimensões U e V fixas e dimensão W otimizada (variável).



Fonte: Datamine (201-?).

Após definidos os realces matemáticos, segue para o *design* dos acessos com os parâmetros das estruturas auxiliares pré-estabelecidos, e por último, mas não menos importante, o sequenciamento da mina para cumprir as metas de produção e qualidade. Estes procedimentos definem o método de lavra e resulta na elaboração detalhada do plano da mina.

## 2.5. Indicadores de Sustentabilidade de Reserva

O planejamento estratégico faz uso de alguns indicadores de sustentabilidade de reserva para ter controle da massa de minério com condições de serem lavradas. Os indicadores e suas metas são definidas por cada mina e suas respectivas equipes de planejamento. Alguns deles são:

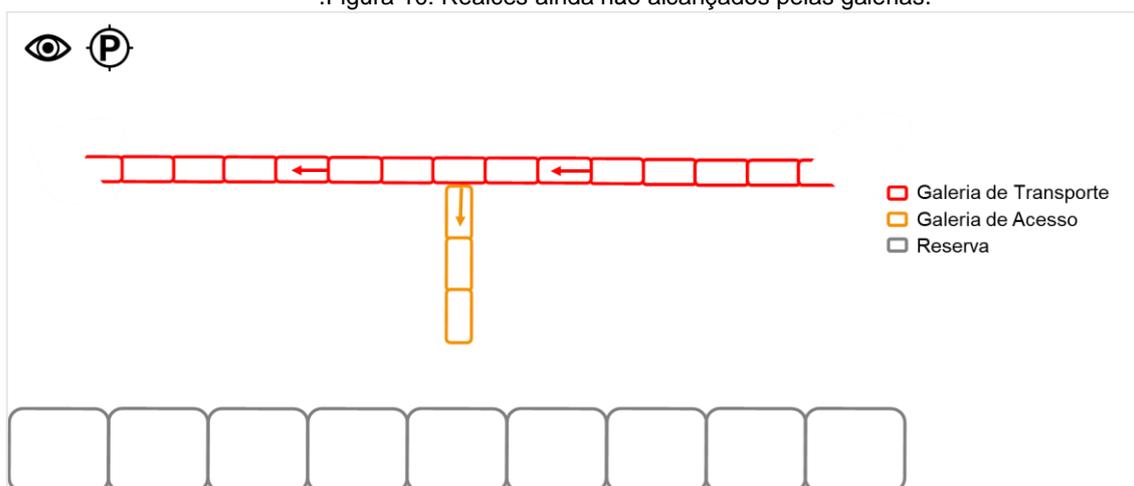
- Reserva Acessada: Massa de realces que foi interceptada por galerias de acesso, mas ainda não possui nenhum desenvolvimento produtivo associado. A reserva ainda não está preparada para ser lavrada, mas com algum investimento de tempo e dinheiro, consegue-se desenvolver e liberar a lavra do nível rapidamente;
- Reserva Desenvolvida: Massa de realces que já possui desenvolvimentos produtivos associados, mas estes ainda não foram finalizados. A reserva pode ser lavrada com um mínimo ou nenhum

trabalho extra, porém pode inviabilizar a extração de reservas minerais planejadas mais adiante;

- Reserva Liberada: Massa de realces que já possui todos os desenvolvimentos produtivos associados finalizados. A reserva já está preparada para ser lavrada com mínimo ou nenhum trabalho extra sem impactar negativamente o restante das reservas minerais planejadas adiante.

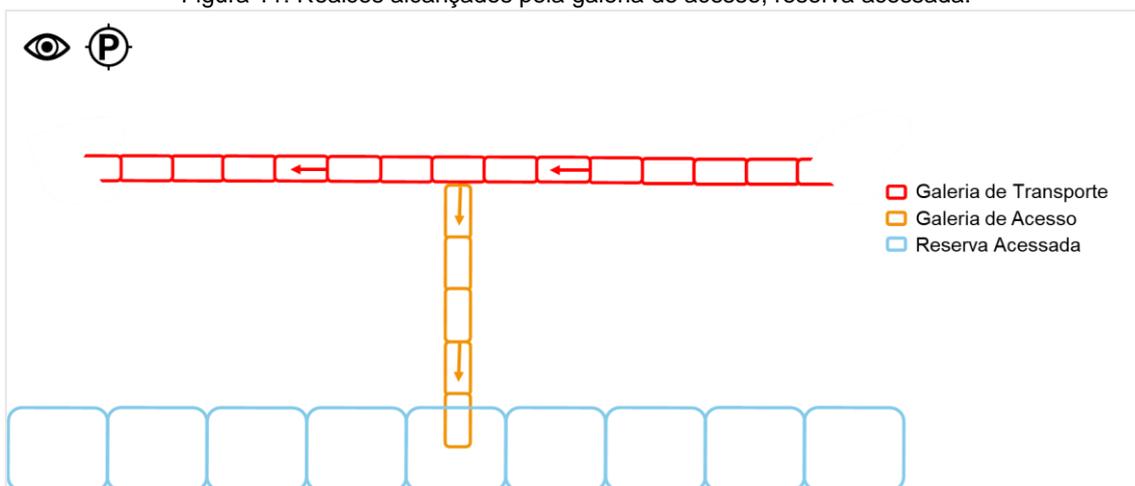
Na Figura 10, são apresentados os realces que ainda não foram alcançados pelas Galerias de Acesso (GA) e setas que indicam o sentido de avanço das atividades. Quando a GA intercepta esses realces, eles passam a ser classificados como Reserva Acessada, conforme ilustrado na Figura 11. Após a conclusão da GA, inicia-se o desenvolvimento produtivo. À medida que esta galeria avança, origina-se a Reserva Desenvolvida, como mostrado na Figura 12. Devido à sequência de lavra dos realces ser realizada em recuo, é necessário finalizar completamente o desenvolvimento produtivo para que todos os realces do nível sejam liberados para a lavra. Somente após essa etapa, esses realces são considerados como Reserva Liberada, conforme demonstrado na Figura 13.

.Figura 10: Realces ainda não alcançados pelas galerias.



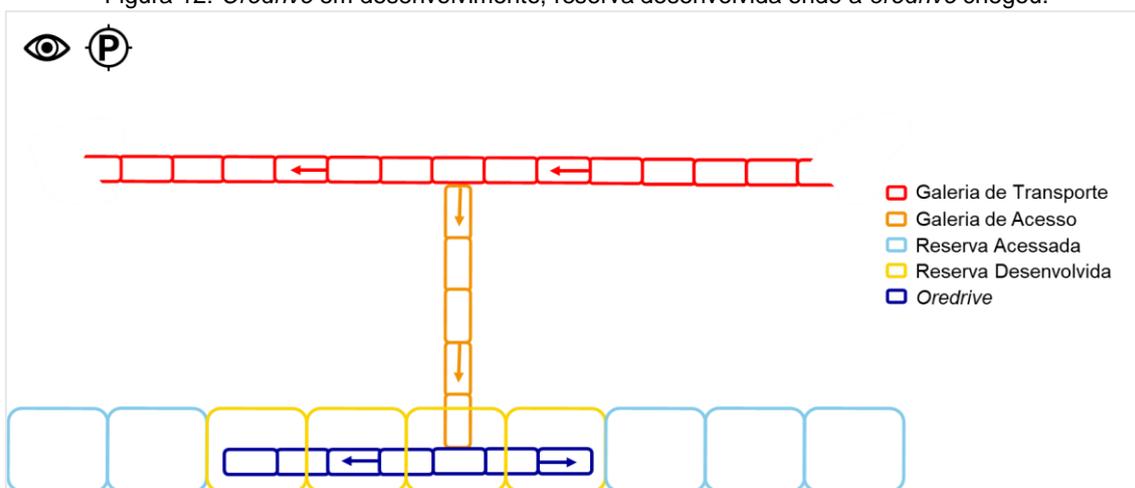
Fonte: Autor (2024).

Figura 11: Realces alcançados pela galeria de acesso, reserva acessada.



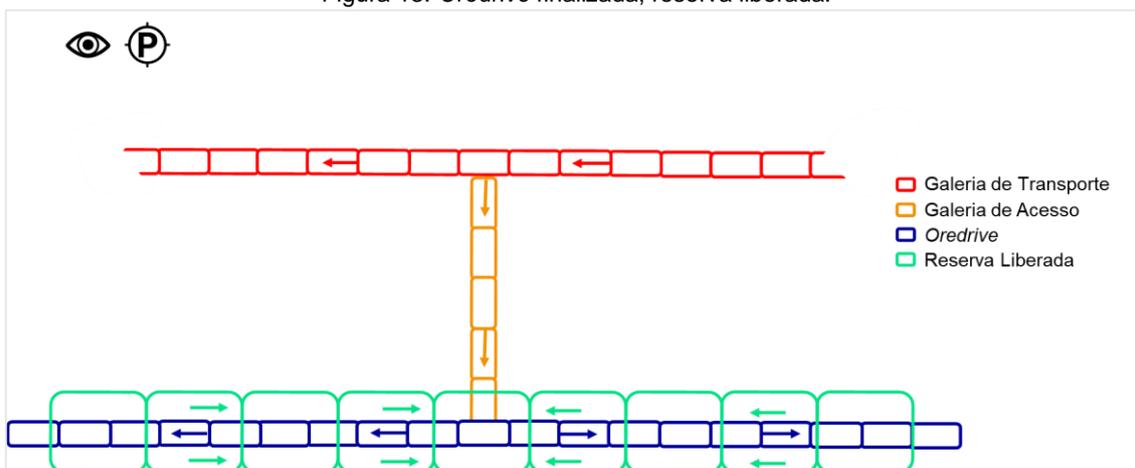
Fonte: Autor (2024).

Figura 12: Oredrive em desenvolvimento, reserva desenvolvida onde a oredrive chegou.



Fonte: Autor (2024).

Figura 13: Oredrive finalizada, reserva liberada.



Fonte: Autor (2024).

Diferente da reserva desenvolvida e acessada, a reserva liberada está pronta para as atividades de lavra, com pouco ou nenhum trabalho adicional de infraestrutura. Ela oferece uma visão clara da quantidade de minério disponível, garantindo a continuidade e flexibilidade da produção, mesmo em caso de imprevistos. Esse indicador é crucial para o planejamento estratégico e operacional da mina, permitindo uma previsão mais precisa da produção a curto prazo e facilitando a gestão de recursos.

A reserva liberada é a interface entre o planejamento e a operação, sendo vital para a eficiência operacional, o planejamento econômico e o gerenciamento de riscos. Com essa reserva, a mina pode operar de forma mais eficiente, reduzindo custos adicionais e maximizando o uso dos recursos disponíveis. Além disso, ela permite manter um fluxo de caixa estável, já que a produção contínua gera receitas constantes, o que é fundamental para atingir metas financeiras e garantir a sustentabilidade econômica da operação.

O controle da reserva liberada também protege a mina contra flutuações nos preços dos metais, pois a produção não é imediatamente afetada por dificuldades no acesso a áreas mais profundas. Em períodos de alta nos preços, a reserva pode ser rapidamente explorada para maximizar o retorno. Em contrapartida, em cenários de queda nos preços, a operação pode ser desacelerada, preservando o valor da reserva. A flexibilidade proporcionada pela reserva liberada permite ajustes rápidos em resposta às variações na demanda do mercado.

Os indicadores de sustentabilidade de reserva fornecem informações valiosas para o planejamento e operação, sinalizando áreas prontas para lavra, desenvolvidas ou que ainda precisam de desenvolvimento. Isso auxilia na alocação eficiente de recursos e na priorização de futuras atividades.

O valor ideal da reserva liberada deve atender à demanda de minério durante o desenvolvimento de novas frentes de lavra, evitando interrupções operacionais e garantindo a continuidade da produção no curto e médio prazo. Ela deve ser suficiente para garantir a produção planejada no curto e médio prazo, prevenindo possíveis contratemplos. No entanto, os custos de manutenção

dessa reserva, como o desenvolvimento de galerias e infraestrutura, devem ser equilibrados com a capacidade financeira da mina. Manter uma reserva liberada excessiva pode resultar em gastos desnecessários.

Até que se atinja o nível desejado de reserva liberada, o sequenciamento de lavra deve priorizar o desenvolvimento de acessos e a construção de galerias, como rampas, *crosscuts* e *oredrives*, garantindo acesso rápido às áreas prioritárias. Antes de expandir a reserva liberada, é necessária uma análise econômica para assegurar que os custos de desenvolvimento e extração sejam compensados pelo valor do minério. Áreas de baixo teor ou alto custo podem não justificar o investimento. Contudo, soluções de sequenciamento eficientes permitem controlar as metas de massa da reserva liberada de forma otimizada.

Outro aspecto crucial ao manter galerias abertas por longos períodos para garantir a reserva liberada é o impacto geotécnico. Com o tempo, a estabilidade das galerias pode ser comprometida devido à degradação do maciço rochoso, redistribuição de tensões, infiltração de água ou outros fatores ambientais. Essas condições podem exigir intervenções como reforço estrutural ou reescavação, aumentando os custos operacionais. Portanto, em operações voltadas à manutenção de reservas liberadas a longo prazo, é essencial o monitoramento contínuo das condições geotécnicas e a realização de estudos periódicos para avaliar a necessidade de retrabalho ou medidas corretivas, garantindo tanto a segurança quanto a viabilidade operacional.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

As dimensões e a localização dos realces empregados no planejamento deste estudo foram fundamentadas no cenário otimizado de Filinkoski (2021). Para garantir a continuidade das análises, utilizou-se o mesmo modelo de blocos. Filinkoski (2021) conduziu uma avaliação do impacto econômico de cenários resultantes da otimização do MSO, onde foram investigadas diversas permutações nas dimensões das escavações, bem como na disposição dos realces e pilares.

O valor de corte, juntamente com os parâmetros econômicos e operacionais, foi estabelecido com base na análise de relatórios de empresas mineradoras que apresentam características semelhantes em termos de corpo mineral, método de lavra e teores. Esses relatórios são elaborados conforme as normas para a definição de Recursos e Reservas NI 43-101 do CIM (Instituto Canadense de Mineração, Metalurgia e Petróleo) e o código JORC (Comitê Conjunto de Reservas de Minério) do The Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves.

Os preços das *commodities* Au, Ag, Cu e Co utilizados neste trabalho foram calculados com base na média dos valores dos últimos dez anos, conforme os dados disponíveis na London Metal Exchange (LME, 2020). As alíquotas de impostos sobre essas *commodities* estão em conformidade com a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), de acordo com a legislação brasileira (BRASIL, 2017).

Como o corpo mineral estudado consiste em um depósito polimetálico, e o presente trabalho não se aprofunda nos aspectos do processamento mineral, assume-se que todas as *commodities* serão aproveitadas na etapa de beneficiamento do minério. Para viabilizar o planejamento dos realces econômicos no MSO, foi necessário definir uma função de benefício (Eq.1) a ser utilizada como critério de otimização. No cálculo da função de benefício, foram consideradas a receita (Eq.2) e os custos (Eq.3), sendo o valor de corte (Eq.4) determinado com base na receita mínima exigida para cobrir os custos de extração. Além disso, foram atribuídos os respectivos preços de venda, taxas de recuperação metalúrgica e custos de cada *commodity* em cada bloco do modelo.

$$\text{Função Benefício} = \text{Receita} - \text{Custos} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{Receita} = \text{Teor} \times \text{Recuperação} \times \text{Preço} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\text{Custo} = \text{Custo Lavra} + \text{Custo Processamento} + \text{Custo Geral\&Adm} + (\text{Receita} \times \text{Royalties}) \quad \text{Eq. 3}$$

$$\text{Cut Off Value} = \frac{\text{Custo Lavra} + \text{Custo Processamento} + \text{Custo Geral\&Adm}}{1 - \text{ROYALTIES}} \quad \text{Eq. 4}$$

Para continuidade deste estudo, os valores de recuperação e custos adotados seguem os mesmos estabelecidos por Filinkoski (2021), conforme detalhado na Tabela 2. Esses parâmetros foram fundamentados nas médias de valores reportados em relatórios técnicos publicados nas bolsas de valores, incluindo os estudos Jacobina Gold Mine (2020), Turmalina Mine Complex (2020), Caeté Mining Complex (2020), Sunrise Nickel-Cobalt Project (2018), Projeto de Cobre Bom Jardim (2017) e Aranzu Mine (2015).

Tabela 2: Receitas e custos utilizados para cálculo da função benefício e *Cut off Value*.

<b>Receitas</b>		
Preço Au	51.44	USD/g
Preço Ag	0.64	USD/g
Preço Cu	7,000.00	USD/g
Preço Co	35,000.00	USD/g
Recuperação Au	84%	
Recuperação Ag	70%	
Recuperação Cu	85%	
Recuperação Co	85%	
<b>Custos</b>		
Custo Lavra	27,84	USD/t
Custo Processamento	14,42	USD/t
Custo Geral & Adm	8,03	USD/t
Custo Desenvolvimento	2230,00	USD/m
Royalties	2%	
<b>Cut off Value</b>	51.32	USD/t

Fonte: Filinkoski (2021).

O método de lavra selecionado foi o *Sublevel Stopping*, amplamente empregado em operações subterrâneas no mundo todo devido aos seus custos relativamente baixos e à alta flexibilidade no sequenciamento das atividades. Esse método permite considerar múltiplas frentes de desenvolvimento e lavra, possibilitando a extração simultânea de blocos com diferentes teores em níveis distintos, o que facilita o cumprimento das metas de ROM, teor, desenvolvimento,

reserva liberada, entre outros. As dimensões dos realces os pilares foram definidas com base no cenário ideal selecionado por Filinkoski (2021), os quais foram projetados com altura de 20 m, largura de 25 m e espessura variando entre 5 e 50 m. Formando painéis com 60 m de altura e 75 m de largura, separados por pilares de teto (*sill pillars*) de 5 m e pilares de contenção lateral (*rib pillars*) com 5 m de largura.

O planejamento desenvolvido neste estudo segue práticas padrão aplicadas à conversão de Recursos em Reservas, com o sequenciamento das atividades elaborado em uma perspectiva do longo prazo. Esse planejamento visa analisar o comportamento das reservas acessada, desenvolvida e liberada. destacando a importância do controle sobre elas.

A metodologia do presente trabalho para estudar a reserva liberada no planejamento é resumida abaixo e detalhadas nos tópicos subsequentes:

- Definição de valor de corte para geração de sólidos potencialmente lavráveis, baseado em parâmetros técnicos e econômicos atualizados e adotados nas principais minas ao redor do mundo;
- Geração de sólidos (realces e pilares) ótimos no MSO da Datamine;
- Desenho de acessos (galerias de transporte e galerias de acesso) e de produção (*oredrives*);
- Desenho do acesso principal (rampa) e secundário (travessas);
- Sequenciamento longo prazo da mina considerando metas de qualidade e produção comumente utilizadas por minerações conceituadas no mercado.

Para estas análises, foram utilizados os *softwares* da Datamine Studio UG v3.2.85.0 e EPS v3.1.144.14987.

### **3.1. Desenho dos acessos**

Os parâmetros do *design* dos acessos são descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros dos acessos.

Desenvolvimento	Forma	Largura (m)	Altura (m)	Raio do Arco (m)	Inclinação
Rampa		6	5	3	15%
<i>Passing Bay</i>		12	5	3	0%
Travessa		6	5	3	1%
Galeria de Transporte		6	5	3	1%
Galeria de Acesso		6	5	3	1%
<i>Oredrive</i>		6	5	3	1%
<i>Mucking Bay</i>		6	5	3	1%
<i>Sump</i>		6	5	3	10%
Galeria de Ventilação		6	5	3	1%
<i>Raise</i>		3	3	1.5	70° - 90°

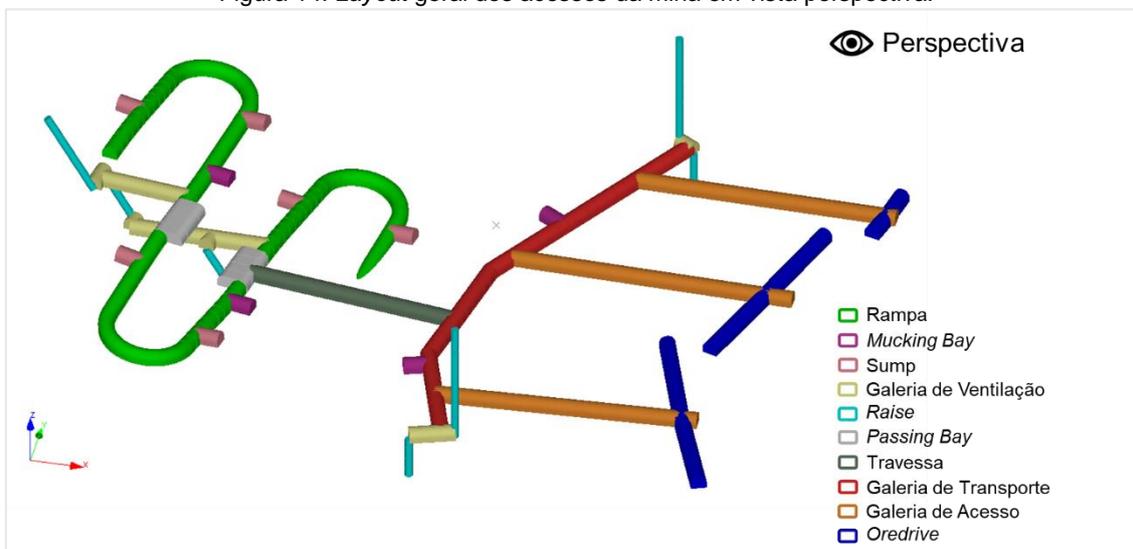
Fonte: Autor (2024).

A rampa foi projetada com uma inclinação de 15%, incorporando *sumps* a cada 100 m, com 10 m de comprimento e uma inclinação de 10%. Os *mucking bays* foram distribuídos a cada 70 m, também com 10 m de comprimento. À medida que se aproxima da travessa, a rampa apresenta uma redução de 1% na inclinação a cada 2 metros de avanço, até atingir uma inclinação de 0%. Nos pontos de intersecção entre a rampa e a travessa, foram projetados *passing bays* com 10 m de comprimento para facilitar as manobras e mitigar riscos de acidentes.

A partir da travessa, inicia-se o avanço da galeria de transporte, que conta com *mucking bays* a cada 70 m. Esta galeria foi desenvolvida no *footwall* do corpo mineral, a uma distância de 50 m dos realces, respeitando o limite geotécnico estabelecido para este estudo. Da galeria de transporte, são construídas galerias de acesso que se conectam ao corpo transversalmente, a partir das quais as *oredrives* passam sob os realces, onde será realizada a perfuração ascendente dos leques. Todos os desenvolvimentos, desde a *oredrives* até a travessa, têm uma inclinação de 1% para facilitar o escoamento da água gerada pela lavra dos

realces e pelos avanços realizados no maciço. A ventilação é garantida por meio de galerias que se originam da rampa e das extremidades da galeria de transporte, em formato de T, a partir da qual se ramificam os *raises*, que tem inclinações de 70° e 90° em relação à rampa e à galeria de transporte respectivamente, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14: *Layout* geral dos acessos da mina em vista perspectiva.



Fonte: Autor (2024).

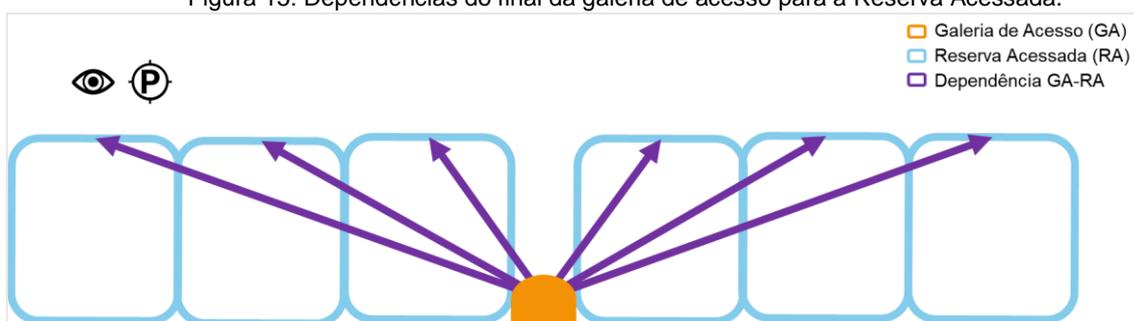
Para o presente estudo, foram selecionados três tipos de indicadores de sustentabilidade da reserva: Reserva Acessada, Reserva Desenvolvida e Reserva Liberada. As atividades associadas a esses indicadores foram criadas como atividades derivadas, incluindo dados de massa, volume e teor originários da atividade mãe, que serão utilizados para calcular a massa e o teor das reservas.

Após a fase de estudo e planejamento do *design* da mina, torna-se necessário programar uma sequência lógica para todas as atividades de desenvolvimento, lavra e suas derivadas. As atividades de desenvolvimento seguem uma lógica clara, que pode ser facilmente compreendida, pois basta respeitar uma ordem cronológica para sua execução. Inicialmente, a rampa deve ser desenvolvida; o *sump* só pode ser iniciado após a rampa ser finalizada até seu ponto de partida. Essa mesma lógica se aplica à *muckingbay*, galeria de ventilação, *raise*, *passingbay*, travessa, galeria de transporte, galeria de acesso e *oredrive*, com a lavra sendo realizada em recuo no mesmo subnível.

### 3.2. Dependências das Reservas

As dependências de lavra devem ser definidas antes do sequenciamento, definindo as atividades predecessoras e atividades derivadas, utilizando um algoritmo lógico da sequência de lavra. Seguindo a ordem lógica das atividades, após desenvolvimento da Galeria de Transporte (GT), a GA é desenvolvida e acessa o corpo, dando início a Reserva Acessada através da dependência do final da GA para o início da RA, como ilustrado na Figura 15.

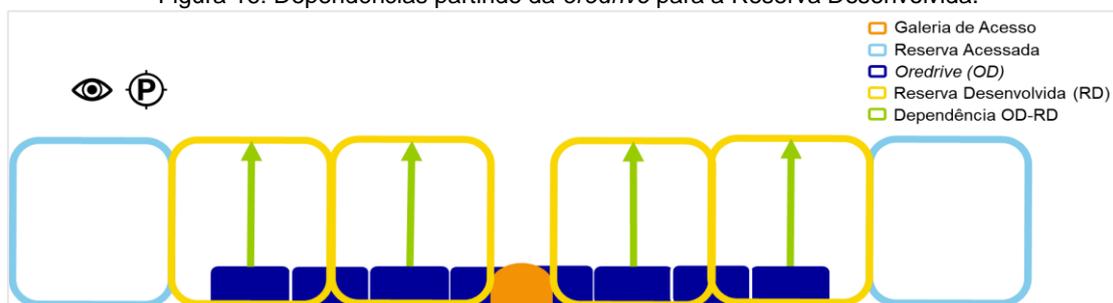
Figura 15: Dependências do final da galeria de acesso para a Reserva Acessada.



Fonte: Autor (2024).

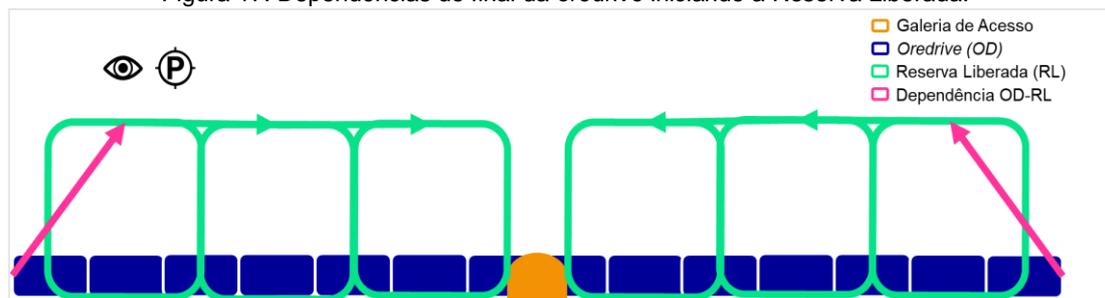
Em seguida, dá-se início à *oredrive*, que liberam a reserva desenvolvida à medida que o desenvolvimento produtivo avança (Figura 16). Após a conclusão da *oredrive*, a Reserva Liberada também é liberada e a lavra enfim pode ser iniciada sem o bloqueio das reservas minerais da mina (Figura 17).

Figura 16: Dependências partindo da *oredrive* para a Reserva Desenvolvida.



Fonte: Autor (2024).

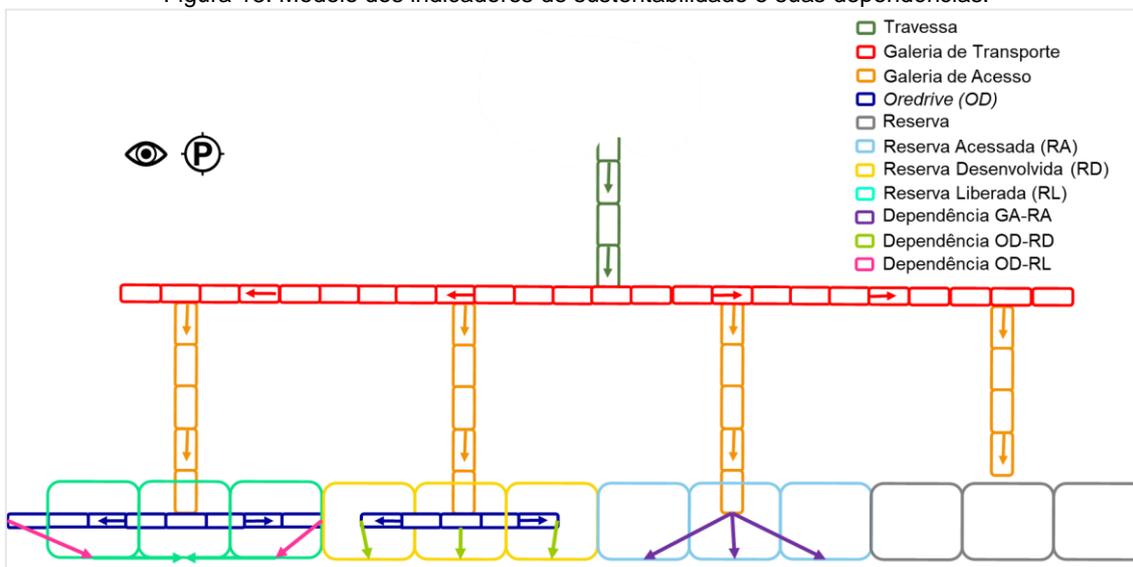
Figura 17: Dependências do final da *oredrive* iniciando a Reserva Liberada.



Fonte: Autor (2024).

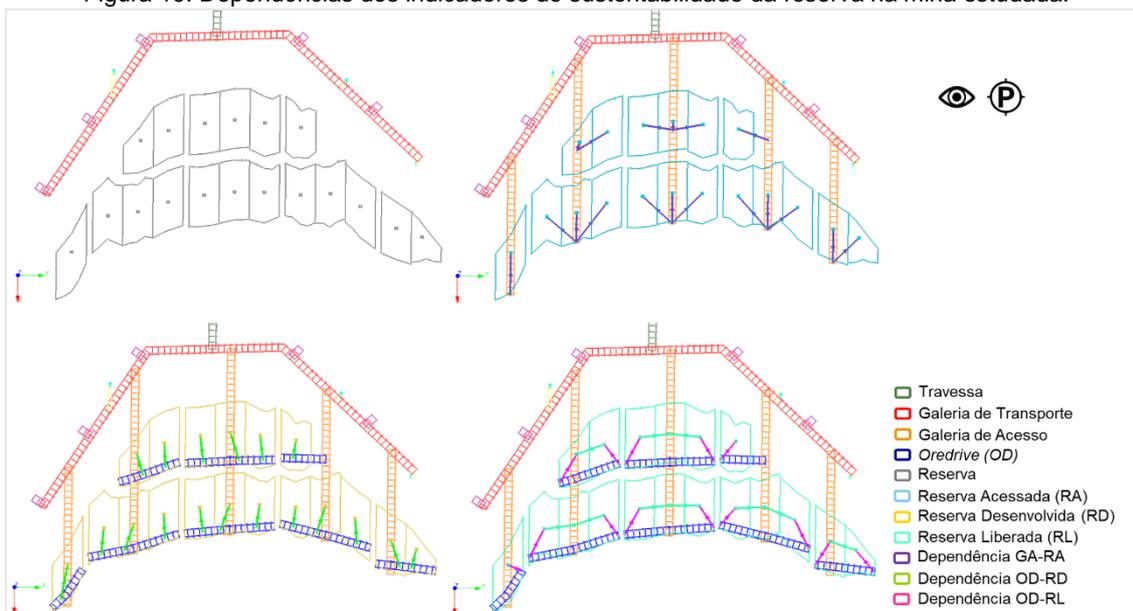
O *design* adotado, conforme ilustrado na Figura 18, proporciona maior flexibilidade, oferecendo mais opções no controle da reserva. A Figura 19 apresenta imagens que demonstram como essas dependências foram estruturadas no planejamento deste projeto.

Figura 18: Modelo dos indicadores de sustentabilidade e suas dependências.



Fonte: Autor (2024).

Figura 19: Dependências dos indicadores de sustentabilidade da reserva na mina estudada.



Fonte: Autor (2024).

### 3.3. Sequenciamento da mina

O sequenciamento foi elaborado com o objetivo de analisar o comportamento da reserva liberada, utilizando diferentes metas de ROM e

metragem desenvolvida, a fim de minimizar flutuações da reserva liberada ao longo do tempo. Foram elaborados cenários com a metas de metragem do desenvolvimento inicial: 60, 90, 120 e 150 m/mês, estabilizando a massa da reserva liberada em: 100, 150, 200, 250, 300, 350 e 400 kt/mês com as metas de ROM (kt/mês) descritas na Tabela 5. A Tabela 4 mostra as premissas utilizadas no sequenciamento.

Tabela 4: Premissas do sequenciamento.

Taxa de Lavra (t/mês)	5000
Taxa de Avanço (m/mês)	60

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5: Metas do sequenciamento.

Desenvolvimento Inicial (m)	ROM (kt/mês)
60	15.8
	19.6
	25
90	15.8
	19.8
	26.3
	32.6
	37.8
120	15.4
	20.5
	28.3
	31
	41.3
	45.9
	48.6
150	27.4
	35.4
	42.9
	49.1
	50.7

Fonte: Autor (2024).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

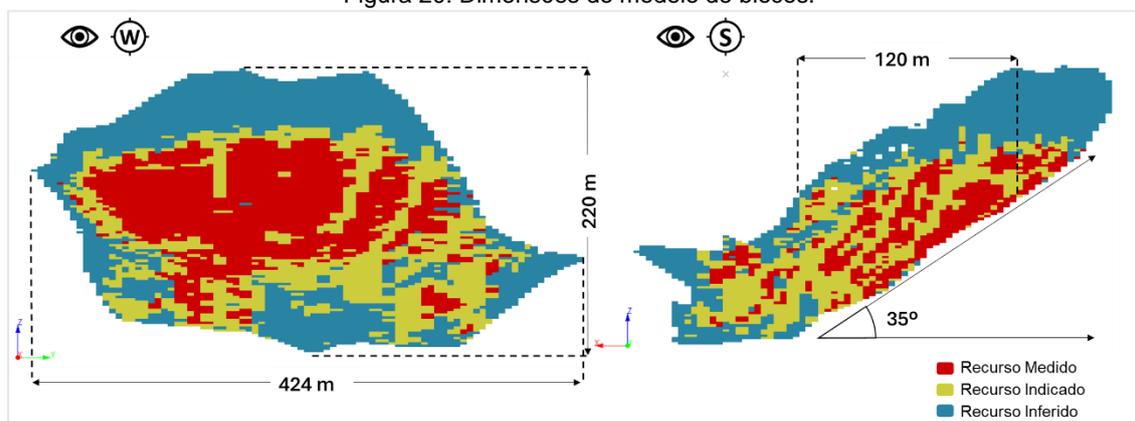
O modelo de blocos empregado neste estudo baseia-se no depósito mineral fictício da base tutorial da Datamine®, apresentando dimensões máximas de 420 m de largura, 220 m de altura, com uma potência que varia de 5 a 120 m e uma inclinação média de 35° (Figura 20). O corpo mineral é composto pelas commodities Au, Ag, Cu e Co, com teores médios de 2,59 ppm, 57,6 ppm, 0,57% e 0,05%, totalizando uma massa de 12,3 Mt, conforme resumido na Tabela 6.

Tabela 6: Resumo do modelo de blocos por recurso.

Recurso	Massa (Mt)	Au (ppm)	Ag (ppm)	Cu (%)	Co (%)
Medido	6.02	2.61	58.06	0.55	0.05
Indicado	3.66	2.68	57.02	0.55	0.05
Med + Ind	9.68	2.64	57.67	0.55	0.05
Inferido	2.59	2.41	57.49	0.63	0.05
<b>Total</b>	<b>12.27</b>	<b>2.59</b>	<b>57.63</b>	<b>0.57</b>	<b>0.05</b>

Fonte: Autor (2024).

Figura 20: Dimensões do modelo de blocos.



Fonte: Autor (2024).

O processo de conversão de recursos para reservas consistiu em diversas etapas que ocasionaram ajustes na massa de minério e de metal contido. Os principais fatores que impediram a plena conversão de recursos para reservas incluem:

- Recursos alocados em *rib pillars*, *sill pillars* e *longitudinal pillar*;
- Aspectos geométricos, como espessura, inclinação e continuidade da lente mineralizada;

- Recursos abaixo do *cut off grade* que não originam realces na fase de otimização e execução;
- Ajustes para garantir maior operacionalidade do realce.

É relevante monitorar as perdas no processo de planejamento e avaliar sua natureza, considerando a possibilidade de uma futura extração do material remanescente. Da Figura 21 a Figura 25 apresentam-se as perdas na massa de minério e metal contido, respectivamente, do recurso M+I+I para os recursos inclusos nos realces finais. Ao analisar a conversão de recursos, verifica-se uma taxa 72% para massa, 73% para o ouro, 71% para a prata, 75% para o cobre e 74% para o cobalto.

Figura 21: Perdas de minério ao longo do processo.



Fonte: Autor (2024).

Figura 22: Perdas de metal - Ouro.



Fonte: Autor (2024).

Figura 23: Perdas de metal - Prata.



Fonte: Autor (2024).

Figura 24: Perdas de metal – Cobre.



Fonte: Autor (2024).

Figura 25: Perdas de metal - Cobalto.



Fonte: Autor (2024).

Os cenários com menor desenvolvimento inicial não alcançaram metas de reserva mais altas. Por outro lado, nos casos com um desenvolvimento inicial mais agressivo, não foi possível estabilizar o indicador de reserva em patamares mais baixos, uma vez que quanto maior o avanço das galerias, mais reserva é liberada. A Tabela 7 resume a análise inicial da mina por meio da reserva liberada.

Tabela 7: Dados dos cenários sequenciados.

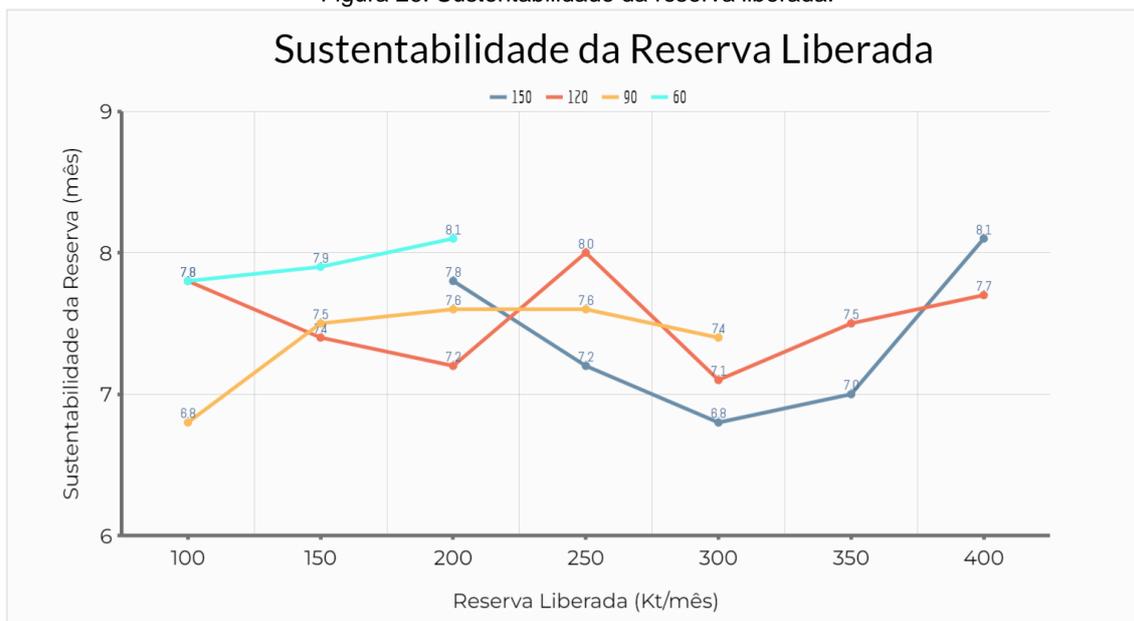
Desenvolvimento Inicial (m)	ROM (kt/mês)	Reserva Liberada (kt/mês)	Reserva Liberada (meses)	VPL (MU\$)	LOM (anos)	ROM/Desenvolvimento (t/m)
60	15.8	123	7.8	222	45	396
	19.6	155	7.9	270	37	360
	25	203	8.1	328	30	339
90	15.8	108	6.8	246	43	393
	19.8	149	7.5	296	36	376
	26.3	201	7.6	402	28	363
	32.6	248	7.6	471	24	339
	37.8	280	7.4	495	22	317
120	15.4	120	7.8	237	44	390
	20.5	152	7.4	328	34	380
	28.3	204	7.2	452	26	363
	31	249	8.0	478	24	351
	41.3	294	7.1	572	19	316
	45.9	343	7.5	595	18	309
	48.6	376	7.7	626	17	290
150	27.4	214	7.8	437	26	360
	35.4	255	7.2	538	21	350
	42.9	293	6.8	607	18	317
	49.1	342	7.0	644	17	314
	50.7	413	8.1	685	15	291

Fonte: Autor (2024).

Os cenários proporcionam análises valiosas e uma visão clara sobre o comportamento da mina em relação a cada meta de reserva liberada, informações que são fundamentais para que o planejador possa adequar o projeto às premissas estabelecidas.

Para esta mina, com este método de lavra, *design* e premissas de sequenciamento, a sustentabilidade da reserva variou entre sete e oito meses, conforme ilustra a Figura 26.

Figura 26: Sustentabilidade da reserva liberada.

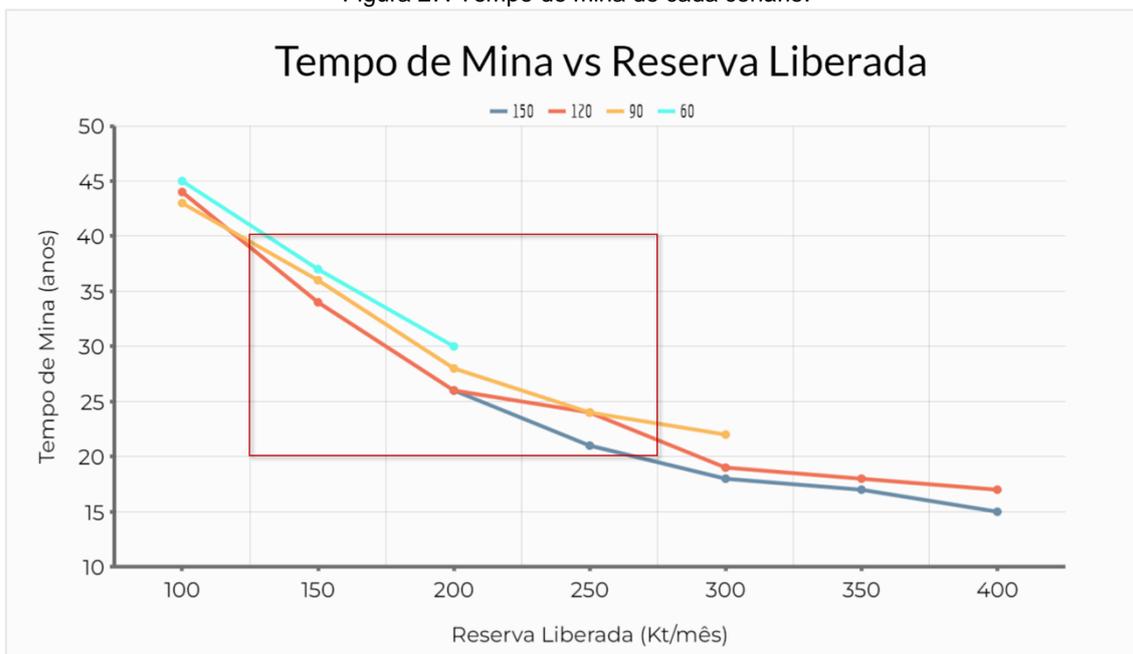


Fonte: Autor (2024).

Com base nos dados obtidos no sequenciamento dos diversos cenários, foi selecionado um caso para uma análise mais aprofundada do comportamento da mina. É importante destacar que, em um projeto de mina real, a reserva liberada não é utilizada como critério para escolher o melhor cenário e as metas para a mina, sendo empregada apenas como acompanhamento de indicadores-chave de desempenho (KPI).

Ao analisar o tempo de vida da mina, é possível identificar alguns candidatos em potencial, de acordo com a posição da diretoria do empreendimento, que pode ter uma visão mais conservadora ou mais arrojada. Este estudo demonstra que metas mais elevadas de reserva liberada resultam em uma maior tonelage de ROM por mês, o que, por consequência, reduz o tempo de vida da mina. Para evitar extremos, foi selecionada uma faixa de tempo de vida da mina mediana entre 20 e 40 anos, destacando os cenários evidenciados no gráfico da Figura 27.

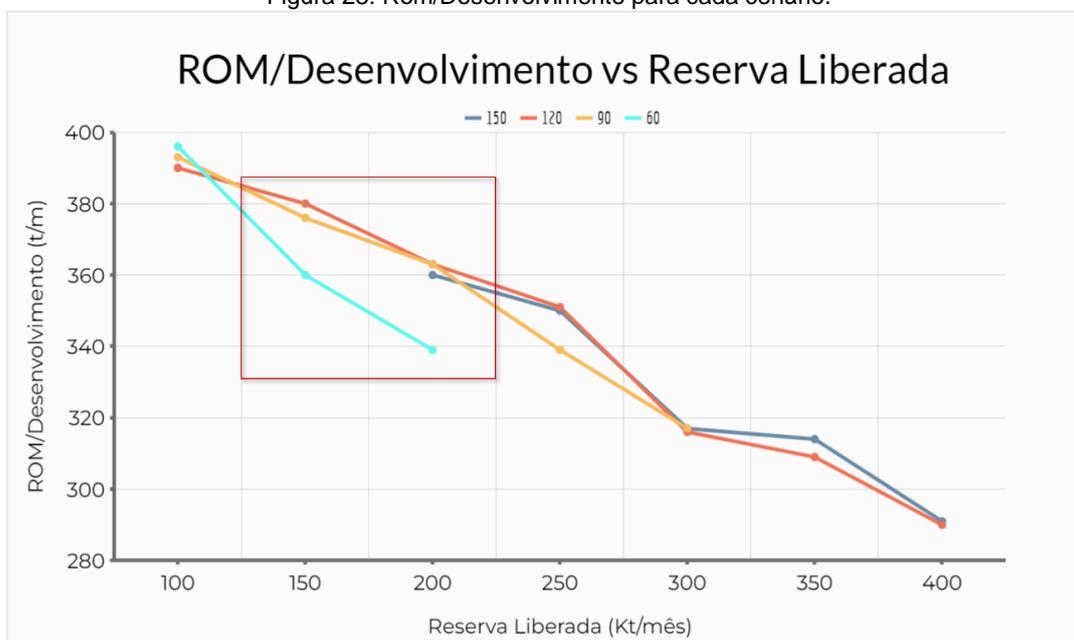
Figura 27: Tempo de mina de cada cenário.



Fonte: Autor (2024).

Um KPI interessante é o de ROM/Desenvolvimento; quanto maior esse índice, melhor, pois indica a possibilidade de lavrar mais, resultando em uma maior receita com um desenvolvimento menor e, conseqüentemente, menores custos. Com base nisso, os cenários delimitados na Figura 28 são os mais indicados, considerando exclusivamente esse KPI e os cenários previamente selecionados na fase anterior.

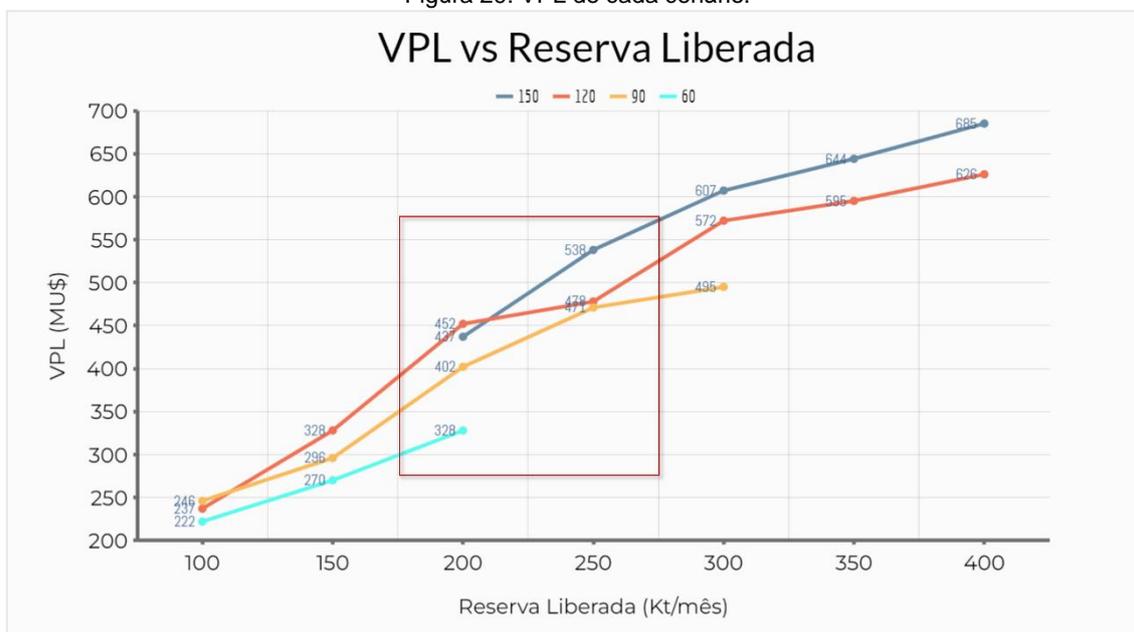
Figura 28: Rom/Desenvolvimento para cada cenário.



Fonte: Autor (2024).

Os cenários que apresentam maiores taxas de ROM/Desenvolvimento são aqueles que possuem as menores reserva liberada, o que resulta em um menor VPL. A tendência natural para aumentar o VPL é adiar custos e antecipar lucros na linha do tempo do empreendimento. Ao analisar os cenários com base exclusivamente no VPL, os melhores candidatos são aqueles que têm metas mais arrojadas de ROM e reserva liberada, conforme destacado na Figura 29.

Figura 29: VPL de cada cenário.



Fonte: Autor (2024).

Com fundamento nas três análises realizadas, os cenários que se destacam com maior frequência são aqueles que estabelecem um patamar de 200 kt/mês para a reserva liberada (Tabela 8).

Tabela 8: Cenário selecionado para novo sequenciamento.

Desenvolvimento Inicial (m)	ROM (Kt/mês)	Reserva Liberada (Kt/mês)	Meta Reserva Liberada (Kt/mês)	Sustentabilidade da Reserva (meses)	VPL (MU\$)	LOM (anos)	ROM/Desenvolvimento (t/m)	Tempo até Início da Lavra (meses)
60	25	203	200	8.1	328	30	339	23
90	26.3	201	200	7.6	402	28	363	17
120	<b>28.3</b>	<b>204</b>	<b>200</b>	<b>7.2</b>	<b>452</b>	<b>26</b>	<b>363</b>	<b>14</b>
150	27.4	214	200	7.8	437	26	360	12

Fonte: Autor (2024).

Entre os candidatos finalistas, o cenário evidenciado na Tabela 8 se destaca em comparação aos demais, apresentando a maior massa de ROM, uma relação ROM/Desenvolvimento superior e um VPL mais elevado, o que o caracteriza como o melhor cenário financeiro. Além disso, esse cenário demonstra uma sustentabilidade da reserva reduzida, resultando em custos mais baixos, mas mantendo um valor operacional consideravelmente atrativo.

A redução do tempo até o início da lavra permite a antecipação da receita, ao mesmo tempo que assegura um período adequado para ajustes nos detalhes do projeto e para a obtenção de informações adicionais sobre a mina antes da lavra. Isso possibilita que a operação e a equipe alcancem um nível de maturidade maior. No entanto, esse cenário também apresenta um tempo de vida da mina mais curto.

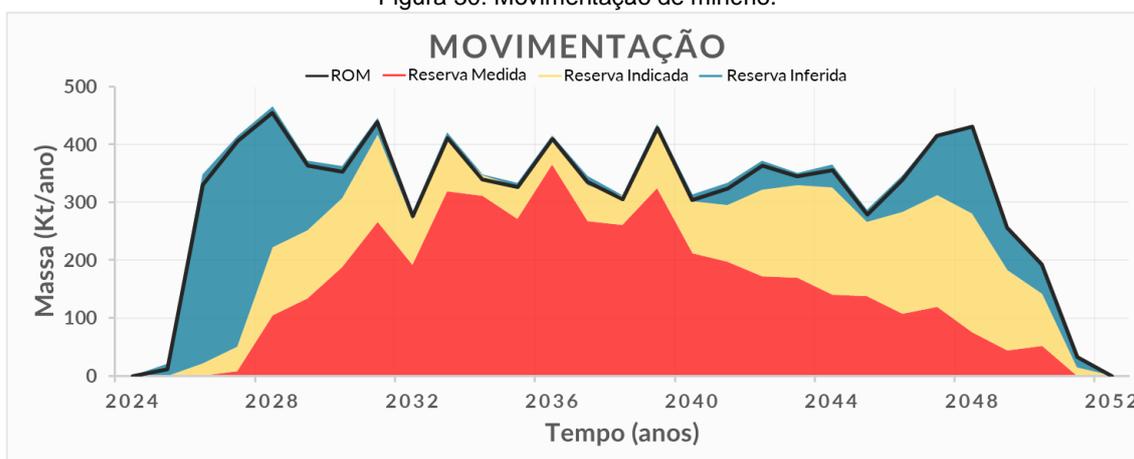
Com base nessa análise, o sequenciamento foi reestruturado com o objetivo de otimizar seu desempenho e realizar investigações mais detalhadas sobre este caso.

#### **4.1. Análise do Cenário do Sequenciado**

Após a definição do cenário, foi iniciada a análise do sequenciamento das operações. A disposição lógica das atividades foi elaborada de forma a classificar o método de lavra da mina como *sublevel stoping* transversal com preenchimento, utilizando a abordagem de lavra *top-down*. O sequenciamento das atividades foi projetado para estabilizar as metas de ROM, metragem e teor, considerando a sustentabilidade das reservas acessadas, desenvolvidas e liberadas como indicadores chave. A implementação do sequenciamento foi realizada por meio da ferramenta Level do EPS v3, que ajusta as atividades de forma a otimizar a utilização dos recursos disponíveis, respeitando os objetivos previamente estabelecidos (Datamine, 2020). A análise das movimentações de material ao longo do tempo, ilustrada na Figura 30, distingue o ROM nas movimentações de material medido, indicado e inferido, detalhando a flutuação das reservas e o impacto de cada uma no contexto geral do sequenciamento. Manter a reserva estável é um fator crítico na eficiência operacional e na viabilidade econômica da mineração, permitindo que o planejamento de longo prazo seja mais robusto, minimizando oscilações de produção que poderiam

impactar diretamente o dimensionamento dos equipamentos, gestão da frota e a continuidade das operações. Essas informações são fundamentais para o dimensionamento dos equipamentos necessários para a lavra e para a definição de parâmetros técnicos-operacionais de processamento. O sequenciamento das atividades proporcionou uma movimentação estável, com flutuações pequenas na ótica do longo prazo, considerando ainda as grandes dimensões dos realces, que ajuda a flutuação do minério.

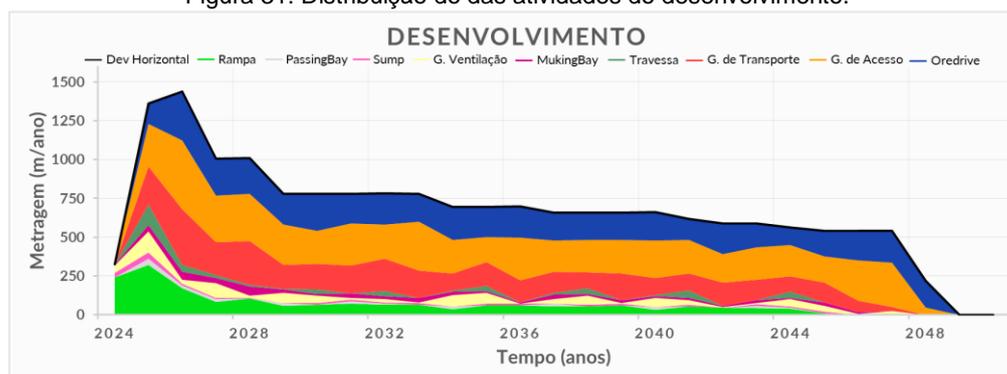
Figura 30: Movimentação de minério.



Fonte: Autor (2024).

Corroborando essa análise, a Figura 31 apresenta os valores distintos de metragem para cada desenvolvimento ao longo do tempo da mina, mostrando a contribuição de cada atividade nas metas do desenvolvimento total. O desenvolvimento está diretamente ligado ao volume de material da reserva liberada, sendo crucial no controle da estabilidade da sustentabilidade da reserva.

Figura 31: Distribuição do das atividades do desenvolvimento.

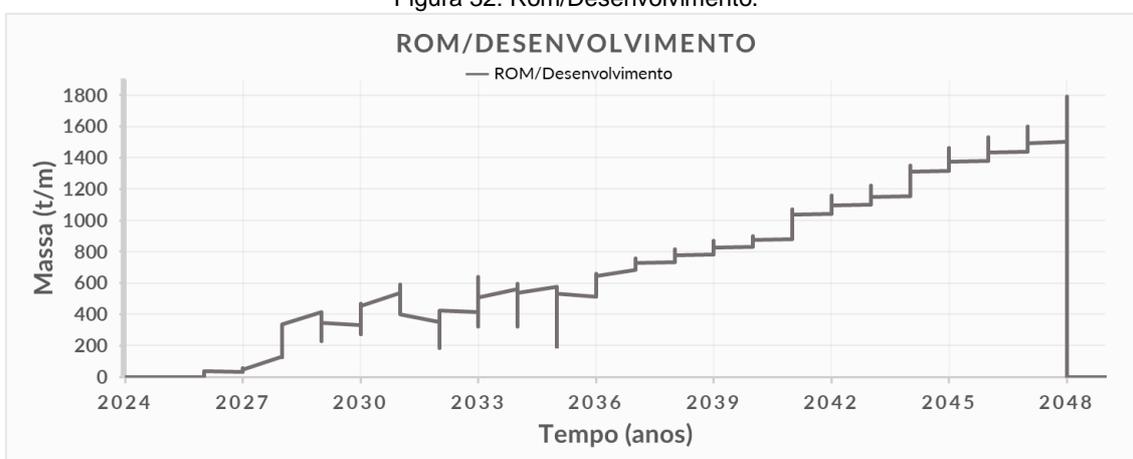


Fonte: Autor (2024).

Um indicador de desempenho relevante é o índice ROM/Desenvolvimento, conforme ilustrado na Figura 32. O gráfico demonstra o crescimento uniforme desse KPI ao longo do tempo, o que é corroborado com a movimentação de minério e a metragem de desenvolvimento apresentadas anteriormente. Essa análise revela um comportamento estável do ROM, à medida que a taxa de avanço do desenvolvimento diminui ao longo da vida útil da mina. A variação na velocidade de desenvolvimento, seja por meio do adiantamento ou adiamento das atividades, tem um impacto direto no valor presente líquido do projeto (Figura 33).

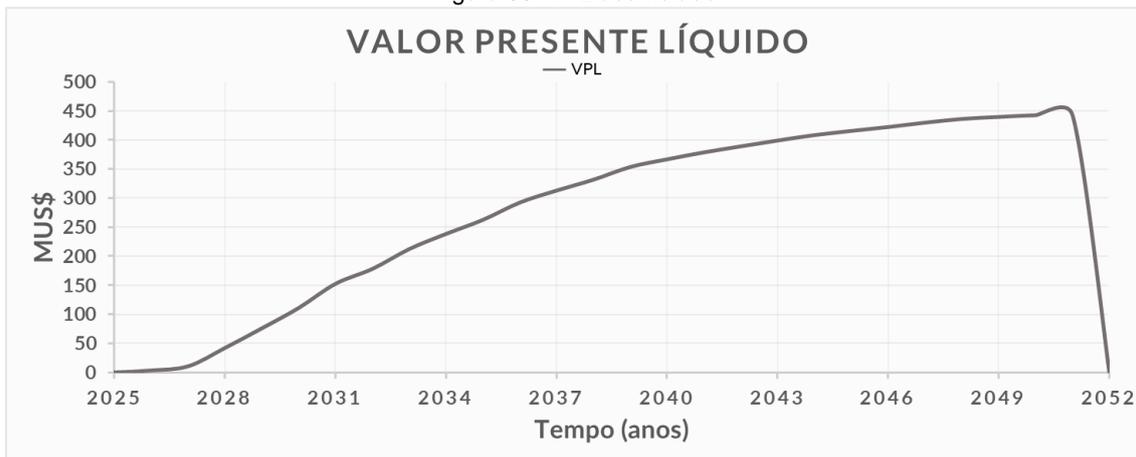
Adiantando as atividades de desenvolvimento, ocorre a liberação de reservas adicionais, permitindo a antecipação das operações de lavra e, potencialmente, do fluxo de receita. Entretanto, é importante que a taxa de lavra acompanhe esse aumento na reserva liberada, juntamente com a disponibilidade da frota para transporte e a capacidade da planta de processamento de absorver todo esse volume. Caso contrário, o que seria uma vantagem financeira pode se transformar em um ônus: gastos operacionais elevados para manter uma reserva liberada de alto volume, assim como custos adicionais de desenvolvimento para garantir que as áreas permaneçam acessíveis até o momento da lavra.

Figura 32: Rom/Desenvolvimento.



Fonte: Autor (2024).

Figura 33: VPL acumulado.

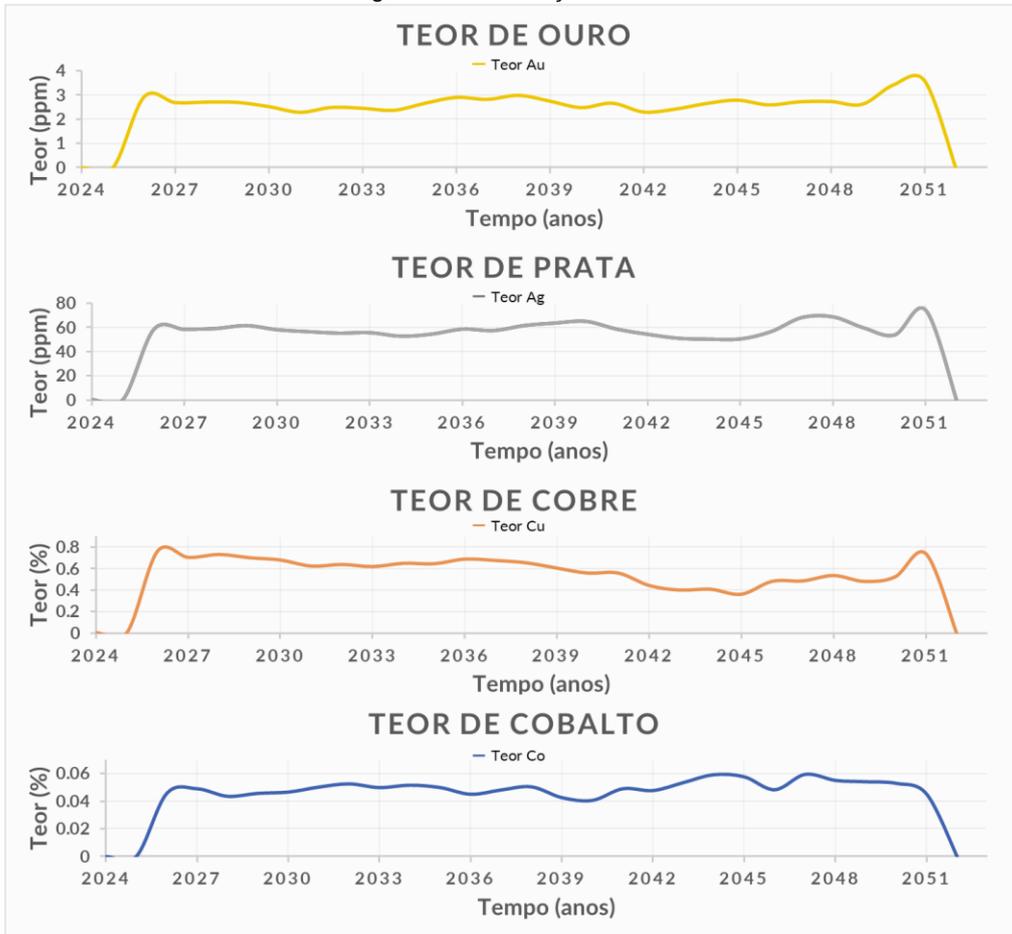


Fonte: Autor (2024).

A Figura 34, detalha o teor dos metais medidos e indicados ao longo da vida útil da mina. As Figura 35, Figura 36 e Figura 37 apresentam o volume de material para cada reserva estudada neste trabalho.

Ao manter as reservas acessada, desenvolvida e principalmente a liberada estável, favorece a consistência na alimentação da planta, na operação e planejamento curto e médio prazo. Com a gestão da reserva, é possível controlar o teor do minério extraído, possibilitando o *blending* para evitar variações de teor e proporcionar um material mais homogêneo. Bem como o *design* dos acessos, foi de grande ajuda no sequenciamento da lavra e estabilidade do teor. Em termos gerais, o controle da reserva traz segurança para decisões estratégicas e operacionais para os gestores, dando uma visão clara da massa e teor disponíveis em médio e curto prazo.

Figura 34: Distribuição de teor.



Fonte: Autor (2024).

Figura 35: Distribuição de massa da reserva acessada.



Fonte: Autor (2024).

Figura 36: Distribuição de massa da reserva desenvolvida.



Fonte: Autor (2024).

Figura 37: Distribuição de massa da reserva liberada.



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 9 apresenta os dados do sequenciamento obtido.

Tabela 9: Dados do novo sequenciamento do cenário selecionado.

	<b>Sequenciamento Atual</b>
<b>Desenvolvimento Inicial (m)</b>	120
<b>Desenvolvimento Médio (m/mês)</b>	63
<b>Desenvolvimento Médio (m/ano)</b>	756
<b>ROM (Kt/mês)</b>	27
<b>ROM Total (Mt)</b>	7.01
<b>Reserva Acessada (Kt/mês)</b>	759
<b>Reserva Desenvolvida (Kt/mês)</b>	591
<b>Reserva Liberada (Kt/mês)</b>	208
<b>Sustentabilidade da Reserva (meses)</b>	7.2
<b>VPL (MUS\$)</b>	443
<b>LOM (anos)</b>	27
<b>Tempo até Início da Lavra (meses)</b>	13
<b>PayBack (anos)</b>	7.5
<b>TIR (% a.a.)</b>	22

Fonte: Autor (2024).

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho fornece *insights* valiosos a respeito dos indicadores de reserva no planejamento de mina. Contudo, é importante ressaltar que os resultados aqui apresentados são aplicáveis para esta mina específica e são função do conhecimento geológico do depósito e das premissas técnicas e econômicas adotadas. Além disso, não foi considerado um estudo geomecânico aprofundado do maciço rochoso, sendo adotadas dimensões de realces e pilares comumente adotados na indústria mineira. A partir deste estudo foi possível verificar os seguintes aspectos:

- A partir da otimização e operacionalização, foi possível converter 12.3 Mt dos recursos geológicos estimados em 8.9 Mt de reserva, o que corresponde a 73% de conversão. As taxas de conversão dos metais contidos de ouro, prata, cobre e cobalto foram de 73%, 71%, 75% e 74%, respectivamente.
- Para o sequenciamento realizado nesta mina, obteve-se um VPL de aproximadamente USD 443 milhões a uma taxa de 10% a.a. e uma TIR de aproximadamente 22% a.a., o que indica o seu potencial de viabilidade econômica.
- A mina apresenta uma flutuação nas movimentações de minério, metais e desenvolvimentos horizontais relativamente estáveis, suficientes para um estudo conceitual de longo prazo. Estes dados podem ser utilizados para dimensionamento dos equipamentos de lavra e planta de beneficiamento, por exemplo.
- Com exceção dos 3 primeiros anos da mina, foi priorizado uma movimentação de recursos com maior confiabilidade geológica.
- Foi possível verificar que o comportamento da reserva liberada é diretamente ligado a metragem desenvolvida e inversamente ligada a massa de minério lavrada nos realces, uma tendência esperada, mas de fundamental importância para o planejamento da mina.
- Observou-se, empiricamente, que com uma maior disponibilidade de reservas acessadas e/ou liberadas, obtinha-se sequenciamentos com movimentações de massa e teor com menos flutuações quando

comparados com sequenciamentos com menor disponibilidade de reservas, uma tendência também esperada, que evidencia uma maior flexibilidade no sequenciamento.

- Com a informação do comportamento da reserva ao longo do tempo, é possível inferir-se os momentos de menor flexibilidade e segurança estratégica da mina, possibilitando um melhor preparo para estes períodos.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Ao decorrer deste trabalho, foram observados alguns pontos interessantes que também poderiam ser objeto de estudo, tais como:

- Realizar a otimização dos realces utilizando teor equivalente, metodologia também adotada para depósitos polimetálicos;
- Verificar a profundidade de transição da mina a céu aberto para a subterrânea neste depósito;
- Após a obtenção da profundidade de transição, verificar as diferenças entre sequenciar as minas a céu aberto e subterrânea separadamente ou concomitantemente;
- Verificar a possibilidade de utilizar outros métodos de lavra e outros *designs* de acessos;
- Verificar o impacto econômico de diferentes metodologias de transporte, como correias transportadoras, *shafts* e rampas;

## 7. REFERÊNCIAS

ALFORD, C. 1995. **Optimization in underground mine design**, 25th APCOM, AusIMM.

ATLAS COPCO. 2007. **Mining Methods in Underground Mining**. Örebro, Suécia.

AURA MINERALS INC. 2015. **Preliminary Economic Assessment of the Re-opening of the Aranzu Mine**. NI 43-101, Zacatecas, Mexico.

BRADY, B. H. G., BROWN, E. T. 2004. **Rock Mechanics for Underground Mining**. Springer science & business media, 3ª Edição.

BRASIL. 2017. **MINISTÉRIO DA FAZENDA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**. Brasília, DF.

BYWATER, S. et al. 1983. **Stress measurements and analysis for mine planning**. Proceedings of the Fifth Congress of the International Society for Rock Mechanics. Melbourne, Austrália.

TAYLOR, H. K., 1977. **Mine valuation and feasibility studies**, in Hoskins, J. R., and Green, W. R., eds., Mineral industry costs, 2nd edn: Spokane, Washington, Northwest Mining Association.

Hartman, H. L., 1987. **Introductory Mining Engineering**. Wiley-Interscience, New York.

NICHOLAS D. E., 1992, **SME Mining Engineering Handbook**, Howard L. Hartman, Society for Mining Engineering, Metallurgy and Exploration, Inc.

CBRR. 2016. **Guia CBRR para declaração de resultados de exploração, recursos e reservas minerais**. Brasília, DF.

CLEAN TEQ HOLDINGS LIMITED. 2018. **Sunrise Nickel-Cobalt Project**. Technical Report NI 43-101, New South Wales, Austrália.

CPRM. 2017. **Relatório Final de Avaliação Econômica do Depósito Mineral de Bom Jardim**. GE21, Goiás, Brasil.

DARLING, P., CARTER, P. G., STEBBINS, S. A., 2011. **SME MINING ENGINEERING HANDBOOK**. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, EUA.

DATAMINE. 2020. **Manual de Treinamento – Enhanced Production Scheduler**. Datamine Brasil, Belo Horizonte, MG.

DATAMINE. 201-?. **Studio UG help document**. Datamine Corporate Limited.

ERDOGAN, G., CIGLA, M., TOPAL, E., YAVUZ, M. 2017. **Implementation and comparison of four stope boundary optimization algorithms in an existing underground mine**. International Journal of Mining, Reclamation and Environment.

HUSTRULID, W. A., BULLOCK, R. L. 2001. **Underground Mining Methods – Engineering Fundamentals and International Case Studies**. SME. Littleton, Colorado, EUA.

JAGUAR MINING INC. 2020. **Technical report on the Caeté Mining Complex**. Technical Report NI 43-101, Minas Gerais, Brasil.

JAGUAR MINING INC. 2020. **Technical report on the Turmalina Mining Complex**. Technical Report NI 43-101, Minas Gerais, Brasil.

JORC. 2012. **Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves**. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Austrália.

FILINKOSKI, G., 2021. **Impacto econômico das dimensões e posições dos realces de uma mina subterrânea em um depósito polimetálico subvertical**. Monografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.

VILLAESCUSA, E. 2003. **Global Extraction Sequences in Sublevel Stopping**. Proceedings of the 12th International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection. Western Australia, Austrália.

VILLAESCUSA, E. 2014. **Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping**. CRC Press. Boca Raton, Florida, EUA.

YAMANA GOLD INC. 2020. **NI 43-101 Technical report - Jacobina Gold Mine**. Bahia, Brasil.