



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



MARCELO DIAS SILVA

**PROJETO E PLANEJAMENTO DE LAVRA EM MINA SUBTERRÂNEA: ESTUDO
DE CASO DA MINA DE ARIPUANÃ – MT, BRASIL**

Ouro Preto – MG
2026

MARCELO DIAS SILVA

marcelo.ds@aluno.ufop.edu.br

**PROJETO E PLANEJAMENTO DE LAVRA EM MINA SUBTERRÂNEA: ESTUDO
DE CASO DA MINA DE ARIPUANÃ – MT, BRASIL**

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva

**Ouro Preto – MG
2026**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586p Silva, Marcelo Dias.

Projeto e planejamento de lavra em mina subterrânea [manuscrito]: estudo de caso da Mina de Aripuanã – MT, Brasil. / Marcelo Dias Silva. - 2026.

60 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Planejamento de lavra. 2. Lavra subterrânea. 3. Minas e recursos minerais. I. Silva, José Margarida da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.272

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcelo Dias Silva

Projeto e Planejamento de Lavra em Mina Subterrânea: estudo de caso da Mina de Aripuanã-MT, Brasil

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 11 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Doutor- José Margarida da Silva - Orientador- Universidade Federal de Ouro Preto

Doutora - Rita de Cássia Pedrosa Santos - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Henrique Nogueira Soares- Tribunal de Justiça de Minas Gerais

José Margarida da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Jose Margarida da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2026, às 10:17, 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 **1066358** e o código CRC **46FC2412**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a minha família, em especial minha mãe, Ana Claudia, meu pai, Mauro Lucio e a minha vó Maria de Lourdes, por todo apoio incondicional do início ao fim.

Às minhas irmãs, Isabela e Manuela, por serem um refúgio de alegria e bondade. Obrigado por todas as risadas e pela amizade fraterna.

A toda minha família, tios, tias, primos e primas, sem vocês não teria me tornado o homem que sou hoje. Obrigado por toda ajuda e conselhos.

Ao meu orientador, Professor José Margarida, pelo apoio, orientação segura e confiança depositada durante a elaboração deste trabalho, contribuindo de forma decisiva para sua conclusão.

À Escola de Minas e à Fundação Gorceix, pelo ensino público, gratuito e de excelência, que proporcionou a base técnica e profissional necessária para minha formação. Ao Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) e a todos os professores, pelos conhecimentos transmitidos, pelo rigor acadêmico e pela dedicação ao longo de toda a graduação.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

O planejamento de longo prazo em minas subterrâneas é essencial para garantir a viabilidade técnica e econômica das operações minerais, integrando informações geológicas, geotécnicas e econômicas ao processo de tomada de decisão. Neste trabalho é apresentado o planejamento de longo prazo de um nível médio de lavra de uma mina polimetálica, Aripuanã, localizada no estado do Mato Grosso, com foco no *design* mineiro, na análise econômica e na definição dos métodos de lavra. A metodologia baseou-se na utilização do modelo de blocos, na análise econômica por meio do *Net Smelter Return* (NSR) e na aplicação dos *softwares* Deswik.CAD, Deswik.IS e Deswik.SCHED para o desenvolvimento do *layout* de lavra, da infraestrutura subterrânea e da análise técnico-econômica consolidada. Foram avaliados os métodos de lavra *Sublevel Stoping* e *Vertical Retreat Mining* (VRM), considerando critérios econômicos, geotécnicos e operacionais. Os resultados indicaram que o nível avaliado apresenta viabilidade técnica e econômica, com NSR médio de aproximadamente US\$105 /t, recuperação de minério média de 90% e produção total planejada da ordem de 3,07 Mt de ROM. A comparação entre os métodos demonstrou que o VRM demanda cerca de 20% a 22% mais escavações em relação ao *Sublevel Stoping*, porém apresenta melhor recuperação e menor diluição, enquanto o *Sublevel Stoping* se mostrou mais eficiente em termos de desenvolvimento.

Palavras-chave: Planejamento de lavra, mina subterrânea, NSR, *sublevel stoping*, deswik.

ABSTRACT

Long-term planning in underground mines is essential to ensure the technical and economic viability of mining operations by integrating geological, geotechnical and economic information into the decision-making process. This work presents the long-term planning of Level 4 of the Aripuanã Underground Mine, located in the state of Mato Grosso, Brazil, focusing on mine design, economic analysis and mining method selection. The methodology was based on the use of a block model, economic evaluation through the Net Smelter Return (NSR) concept, and the application of Deswik.CAD and Deswik.SCHED softwares for mine layout development, underground infrastructure design and consolidated techno-economic analysis. The Sublevel Stopping and Vertical Retreat Mining (VRM) methods were evaluated considering economic, geotechnical and operational criteria. The results indicated that Level 4 is technically and economically feasible, with an average NSR of approximately US\$ 105/t, an average recovery of 90%, and a planned production of approximately 3.07 Mt of ROM. The comparison between mining methods showed that VRM requires about 20% to 22% more excavations than Sublevel Stopping; however, it provides higher recovery and lower dilution, while Sublevel Stopping proved to be more efficient in terms of development.

Keywords: Mine planning, underground mining, NSR, sublevel stopping, deswik.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de blocos de um corpo de minério colorido por teor, em g/t.....	16
Figura 2: Perfuração de furos longos com realce em subníveis.	19
Figura 3: Localização do depósito mineral de Aripuanã.....	21
Figura 4: Mapa geológico do depósito de Aripuanã.....	23
Figura 5: Perfil das escavações.....	25
Figura 6: Escavações de um nível no Método <i>Sublevel Stopping</i>	27
Figura 7: Escavações de um nível no Método <i>Vertical Retreat Mining</i> -VRM.	28
Figura 8: Demonstração de como os blocos são calculados pelo otimizador de <i>stopes</i> do Deswik.CAD.	31
Figura 9: Distribuição dos blocos gerados ao longo da lente de minério.....	32
Figura 10: Visão de planta do modelo 3D de desenvolvimento de um subnível 1 típico para o método de lavra BS.	33
Figura 11: Visão de planta do modelo 3D de um subnível 1 de desenvolvimento típico para o método de lavra VRM.	34
Figura 12: Visão frontal do modelo 3D de níveis típicos do projeto da mina em estudo.	34
Figura 13: Seção de escavação.	35
Figura 14: Demonstração das dimensões dos pilares em um subnível típico do nível 4.	36
Figura 15: Modelo de infraestrutura de um subnível típico.	37
Figura 16: Modelo 3D da infraestrutura típica de um subnível.....	38
Figura 17: Altura do painel do nível 4.....	39
Figura 18: Modelo de blocos no nível 4 sem análise econômica.	43
Figura 19: Modelo de blocos no nível 4 com análise econômica.....	44
Figura 20: Arranjo (<i>layout</i>) do nível 4, subnível 1.....	46
Figura 21: Arranjo (<i>layout</i>) do nível 4, subnível 3.....	47
Figura 22: <i>Design</i> do nível 4.	48
Figura 23: Evolução temporal do CAPEX e do OPEX no planejamento do Nível 4	49
Figura 24: Metragem anual prevista de desenvolvimento mineiro.	50
Figura 25: Massa movimentada por ano.	50
Figura 26: Massa movimentada por método de lavra.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nomenclatura do <i>design</i> de projeto de longo prazo.	33
Tabela 2: Dimensões (largura x altura) das seções e gradiente das escavações.	35
Tabela 3: Dimensões (espessura) dos pilares para desenvolvimento e lavra.	36
Tabela 4: Metragem total de desenvolvimento.	45
Tabela 5: Dados de massa, teor e metragem total projetada para o nível 4 determinados por meio do Deswik.SCHED.	52
Tabela 6: Metragem total planejada.	53
Tabela 7: Metragem planejada em zonas mineralizadas.	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Formulação do Problema	11
1.2	Justificativa	12
1.3	Objetivos.....	12
1.3.1	Objetivo Geral	12
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	Estrutura do Trabalho	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Planejamento de Mina	14
2.1.1	Planejamento de Longo Prazo	14
2.1.2	Planejamento de médio prazo.....	15
2.1.3	Planejamento de curto prazo	15
2.2	Modelagem geológica e modelo de blocos.....	15
2.3	Análise econômica e o conceito de NSR	16
2.4	Critérios geotécnicos e estabilidade de escavações	17
2.5	Método de lavra subterrânea – <i>Sublevel Stopping</i>	18
2.6	Infraestrutura subterrânea e <i>softwares</i> de planejamento.....	20
2.7	Depósito Polimetálico de Aripuanã – MT	20
2.7.1	Geologia e mineralização	21
2.7.2	Condições geotécnicas.....	24
2.7.3	Infraestrutura e sistemas subterrâneos da Mina Aripuanã.....	25
2.7.4	Métodos de Lavra Aplicados em Aripuanã	26
2.7.5	Planejamento e <i>design</i> de longo prazo	28
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Caracterização da pesquisa: natureza, abordagem e método utilizado	30
3.2	Análise do Modelo de Blocos e Classificação Econômica.....	30
3.3	Definição do Método de Lavra	31
3.4	Planejamento do Desenvolvimento Mineiro e <i>Design</i> do Nível 4	32
3.5	Projeto da Infraestrutura Subterrânea	37
3.6	Definição dos subníveis e espaçamento vertical	38
3.7	Análise Técnico-Econômica	39
4	ESTUDO DE CASO	41
4.1	Análise Econômica do Modelo de Blocos.....	41
4.2	<i>Design</i> e Infraestrutura do Nível 4.....	45
4.3	Análise Técnico-Econômica	48
4.4	Discussão dos Resultados	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	56

1 INTRODUÇÃO

O planejamento de lavra é uma das etapas mais complexas e determinantes do ciclo produtivo mineral, pois estabelece as bases técnicas e econômicas que orientam a viabilidade, a sequência e o método de extração do minério. Segundo (Curi, 2017), o planejamento de lavra deve integrar a avaliação econômica com as condições geotécnicas e operacionais do depósito, visando maximizar o aproveitamento dos recursos minerais de forma segura e sustentável. No contexto das minas subterrâneas, esse processo envolve a integração entre informações geológicas, econômicas, geotécnicas e operacionais, de modo a garantir o aproveitamento eficiente do depósito mineral, com segurança e sustentabilidade (Hustrulid; Bullock, 2001).

O planejamento de longo prazo tem como principal objetivo definir o horizonte global de desenvolvimento e produção da mina, englobando projeções de reservas, estimativas de custos e receitas, e o projeto das estruturas principais de acesso e lavra. Conforme (Hall, 2014), essa etapa é estratégica, pois as decisões tomadas nela influenciam diretamente a vida útil do empreendimento, o cronograma de investimentos e as metas de produção futuras. Assim, o planejamento estratégico atua como elo entre a concepção do projeto e sua execução operacional, orientando todas as fases subsequentes da lavra.

A elaboração de planos de longo prazo requer o uso de modelos geológicos tridimensionais, nos quais são aplicadas análises econômicas para determinar a viabilidade de lavra de cada porção do corpo mineralizado. Entre os métodos empregados, destaca-se o cálculo do *Net Smelter Return* (NSR), que permite avaliar o valor líquido recuperável de cada bloco, considerando preços de venda, custos operacionais e recuperações metalúrgicas (Goldie, 2024). Essa análise orienta a definição do teor de corte (*cut-off grade*) e a seleção dos blocos economicamente lavráveis, funcionando como ferramenta central na tomada de decisão em projetos de lavra subterrânea.

Além dos aspectos econômicos, o planejamento de longo prazo deve considerar as condições geotécnicas e estruturais do maciço rochoso, uma vez que essas características influenciam diretamente o traçado do desenvolvimento, a estabilidade das escavações e o dimensionamento das infraestruturas subterrâneas. De acordo com (Oliveira, 2023), o comportamento estrutural do maciço e a qualidade da rocha (avaliada por parâmetros como RMR e Q) condicionam o posicionamento das escavações, impactando diretamente o custo e a segurança da operação. O *design* adequado de acessos, galerias e realces de lavra é, portanto,

essencial para garantir segurança operacional, eficiência de transporte e ventilação adequada das frentes de trabalho (Curi, 2017).

Nesse contexto, a pesquisa desenvolveu um estudo de caso aplicado ao planejamento de longo prazo de uma mina subterrânea polimetálica, com foco no *design* do nível 4, entre 177 e 257 m de profundidade, abordando desde a análise econômica dos blocos até a definição da infraestrutura necessária ao desenvolvimento. O estudo foi conduzido a partir de dados reais de uma operação subterrânea localizada na região Centro-Oeste do Brasil, no estado do Mato Grosso, e reflete práticas usuais do setor mineral, especialmente na etapa de integração entre geologia, economia mineral e engenharia de lavra.

Dessa forma, o trabalho demonstrou a importância da abordagem integrada no processo de planejamento estratégico, evidenciando como os resultados da análise econômica e das condições geotécnicas podem orientar o *design* mineiro, contribuindo para a tomada de decisão e para o aprimoramento da eficiência global do projeto.

1.1 Formulação do Problema

A mineração subterrânea enfrenta o desafio de equilibrar a viabilidade econômica dos empreendimentos com as exigências de segurança operacional e sustentabilidade ambiental. O avanço das frentes de lavra em níveis mais profundos exige um planejamento de longo prazo que considere, simultaneamente, fatores econômicos, geotécnicos e ambientais, de modo a evitar perdas de minério e controlar, em níveis adequados, eventuais surgimentos de água, maior nível de tensões, maior atividade sísmica e reduzir custos de desenvolvimento.

Em muitas operações, o planejamento de longo prazo é realizado com base apenas na estimativa de reservas e na capacidade produtiva, sem uma integração efetiva entre os modelos de blocos, as análises econômicas e o *design* geotécnico. Essa fragmentação pode gerar decisões subótimas, levando a trajetórias de acesso mais longas, aumento de custos operacionais e comprometimento da segurança das estruturas subterrâneas.

Diante disso, surge um questionamento: como o *design* de um nível de mina subterrânea pode ser otimizado a partir da integração entre análise econômica e critérios geotécnicos no planejamento de longo prazo?

1.2 Justificativa

A resposta à questão formulada no item anterior passa pela compreensão de que o planejamento de longo prazo é a principal ferramenta de decisão estratégica de uma mina subterrânea, e deve reunir informações técnicas que orientem o aproveitamento racional do depósito mineral. A integração entre a análise econômica dos blocos (via NSR) e os aspectos geotécnicos do maciço rochoso permite definir *layouts* mais eficientes, seguros e financeiramente sustentáveis.

Do ponto de vista econômico, o uso de indicadores como o NSR possibilita identificar as regiões do corpo de minério de maior retorno financeiro e planejar o desenvolvimento das frentes de lavra de maneira progressiva e rentável. Essa análise contribui para reduzir o volume de estéril movimentado, diminuir os custos de operação e aumentar a vida útil da mina.

Sob o aspecto técnico e geotécnico, a consideração da qualidade do maciço e das restrições estruturais na fase de *design* garante maior estabilidade das escavações e segurança às equipes de operação. A aplicação de métodos empíricos, como as classificações RMR e Q, auxilia na definição de seções de galerias, dimensões de pilares (fundamentais nos métodos de lavra considerados) e orientações de avanço compatíveis com o comportamento do maciço.

Além dos benefícios técnicos e econômicos, o planejamento de longo prazo também possui uma dimensão ambiental e social. Um *design* mais eficiente e integrado contribui para a redução de impactos ambientais, uma vez que diminui a necessidade de escavações desnecessárias, controla o consumo energético e a geração de rejeitos. No campo social, um planejamento adequado promove melhor aproveitamento dos recursos minerais, geração de emprego de longo prazo e fortalecimento da licença social para operar, reforçando a imagem de responsabilidade da mineração perante a comunidade.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estudo de caso aplicado ao planejamento de longo prazo de uma mina subterrânea, com ênfase no projeto de um nível médio de lavra de uma mina polimetálica, integrando a análise econômica dos blocos, os aspectos geotécnicos e o projeto da infraestrutura

mineira, de forma a subsidiar decisões técnicas e estratégicas relacionadas à viabilidade e ao planejamento da lavra.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram os seguintes.

- Definir o método de lavra de acordo com o modelo de blocos.
- Realizar a análise econômica dos blocos de minério.
- Planejar o desenvolvimento do nível 4.
- Projetar a infraestrutura subterrânea necessária.
- Avaliar as condições geotécnicas do maciço rochoso.
- Elaborar uma análise técnico-econômica consolidada.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma a apresentar, de maneira progressiva, os conceitos teóricos, os procedimentos metodológicos e os resultados obtidos.

No capítulo 1 é apresentada a introdução, contemplando a contextualização do tema, a formulação do problema, a justificativa, os objetivos (geral e específicos), bem como a delimitação do escopo do estudo. O Capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, abordando os principais conceitos relacionados ao planejamento de minas subterrâneas, à modelagem geológica e ao modelo de blocos, à análise econômica por meio do conceito de *Net Smelter Return* (NSR), aos critérios geotécnicos e aos métodos de lavra aplicáveis, com ênfase no *Sublevel Stoping* e no *Vertical Retreat Mining*. No Capítulo 3 é descrita a metodologia adotada, detalhando as etapas de caracterização do depósito, análise econômica, definição dos métodos de lavra, planejamento do desenvolvimento mineiro, projeto da infraestrutura subterrânea e aplicação dos *softwares* de planejamento utilizados. O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso e a análise dos resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia ao nível 4 da Mina Subterrânea de Aripuanã, incluindo a avaliação técnico-econômica e a comparação entre os métodos de lavra empregados. Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros, destacando as principais contribuições do estudo e as possibilidades de aprofundamento da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item está a fundamentação teórica para o trabalho desenvolvido, abordando os principais conceitos relacionados ao planejamento e ao *design* de lavra subterrânea. Foram consultadas referências clássicas e contemporâneas da engenharia de minas, contemplando livros, artigos científicos, dissertações e relatórios técnicos que sustentam as etapas metodológicas aplicadas neste estudo.

2.1 Planejamento de Mina

O planejamento de mina é uma das etapas mais importantes e estratégicas da engenharia mineral, pois define as bases técnicas e econômicas que orientam a exploração e a exploração racional do depósito e a sustentabilidade da operação. De acordo com (Curi, 2017), o planejamento de lavra é o elo entre o conhecimento geológico e a execução produtiva, integrando aspectos geotécnicos, econômicos e operacionais de forma a garantir segurança e eficiência. Segundo (Hustrulid e Bullock, 2001), o sucesso de uma operação mineira depende da coerência entre as etapas de planejamento e da capacidade de integrar as decisões de curto, médio e longo prazo dentro de uma mesma estrutura lógica e hierárquica.

Tradicionalmente, o planejamento mineiro é dividido em três horizontes: longo, médio e curto prazo, que se diferenciam pelo grau de detalhe e pelo horizonte temporal. O planejamento de longo prazo é estratégico e define o método de lavra, as taxas de produção e os investimentos; o de médio prazo é tático, voltado ao detalhamento anual das metas e ajustes operacionais; e o de curto prazo é operacional, voltado à execução e controle da produção diária. Essa estrutura integrada assegura a consistência entre o planejado e o executado, contribuindo para a otimização dos recursos minerais e para a sustentabilidade do empreendimento (Hall, 2014; Otto e Musingwini, 2019).

2.1.1 Planejamento de Longo Prazo

O planejamento de longo-prazo (*strategic mine planning/life-of-mine planning*) abrange todo o horizonte de vida da mina, definindo a taxa de produção anual, o método de lavra, acessos principais, infraestrutura de base, reservas lavráveis e cronograma, no âmbito macro. Nele se busca geralmente maximizar o valor presente líquido (VPL) do projeto, considerando incertezas geológicas, de mercado e operacionais (Blom, Pearce e Cote, 2025).

2.1.2 Planejamento de médio prazo

O planejamento de médio prazo (tático) traduz as metas estratégicas em planos anuais, normalmente com horizonte de 1 a 5 anos. Nesse plano, define-se a sequência de lavra de painéis, frentes e níveis, os volumes de produção por período e a alocação de equipamentos e recursos humanos. O planejamento tático deve ser suficientemente flexível para as variações geológicas e operacionais, mas sem perder o alinhamento com os objetivos de longo prazo. Assim, o plano de médio prazo atua como um elo de conexão entre o plano estratégico e o operacional, garantindo que as metas globais sejam transformadas em ações concretas e exequíveis (Pérez *et al.*, 2017).

A complexidade geológica exerce influência em desempenho do projeto, natureza e efetividade do controle geológico (Silva, 2024). Estruturas geológicas complexas aumentam em 25-35% custos operacionais relativamente a modelos mais simples.

2.1.3 Planejamento de curto prazo

O planejamento de curto-prazo (*operational/short-term mine planning*) refere-se ao horizonte de dias até meses, com foco em produção, alocação de unidades, sequência de lavra de câmaras ou blocos, controle de diluição, controle de custos e cumprimento das metas diárias ou semanais (Campeau e Gamache, 2020).

2.2 Modelagem geológica e modelo de blocos

A modelagem geológica é a etapa que busca representar de forma tridimensional a distribuição espacial das rochas e da mineralização de um depósito. A modelagem geológica é o alicerce de todo o processo de planejamento de mina, uma vez que define os limites do corpo mineralizado, as unidades litológicas e as estruturas que controlam o minério (Poniewierski, 2019).

Observa-se na Figura 1 um modelo de blocos, que é a representação tridimensional do corpo de minério dividida em pequenas unidades, denominadas blocos, que contêm atributos como teor, densidade, litologia, recuperação metalúrgica e valor econômico. O teor de ouro é mostrado na legenda, em g/t. A definição do tamanho e da forma dos blocos exerce influência direta sobre a precisão da estimativa de recursos minerais e sobre a viabilidade econômica do projeto. Blocos muito grandes podem reduzir a resolução geológica e aumentar a diluição,

enquanto blocos excessivamente pequenos elevam o custo computacional e dificultam a interpolação. Assim, a determinação do tamanho ótimo do bloco deve equilibrar precisão geológica e eficiência de cálculo (Guo *et al.*, 2024).

Novos aplicativos realizam modelagem de depósitos minerais com recursos tecnológicos capazes de fazê-lo de maneira eficiente, além de facilitar procedimentos da rotina mineira (Silva, 2024).

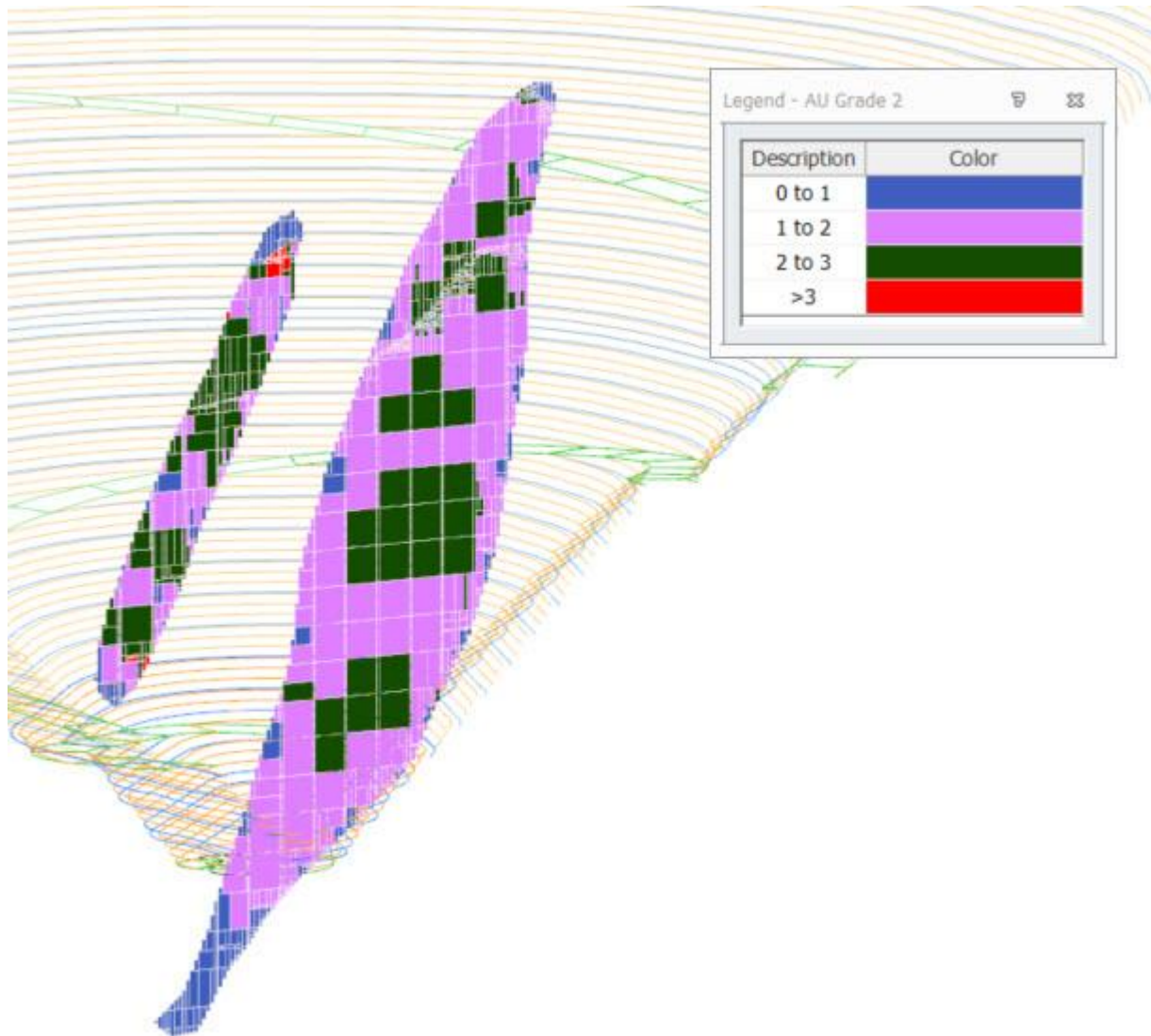


Figura 1: Modelo de blocos de um corpo de minério colorido por teor, em g/t.

Fonte: (Poniewierski, 2025).

2.3 Análise econômica e o conceito de NSR

Os métodos de análise econômica aplicados à mineração buscam equilibrar as variáveis geológicas e operacionais em modelos matemáticos que permitam estimar o valor de cada

porção do depósito. A análise econômica deve integrar dados de teor, recuperação metalúrgica, custo unitário e preço de mercado, de forma a determinar a lucratividade potencial de cada bloco de minério. Essa abordagem é usada tanto para estimar o valor global do depósito quanto para apoiar o planejamento de lavra de curto, médio e longo prazos (Runge, 1998).

Net Smelter Return (NSR) representa a receita líquida por tonelada de minério após deduzidos os custos de transporte, fundição, refino e outros custos “fora da mina” associados à venda dos metais extraídos. Esse indicador é amplamente utilizado em depósitos polimetálicos para estimar o valor econômico dos blocos de minério (Goldie, 2024). Hartman, (1987) denominava-o custo total de produção.

A adoção do NSR como critério de corte (*cut-off*) ou de priorização de blocos exige atenção à sua aplicabilidade. Embora o NSR seja frequentemente usado para *design* de câmaras de lavra subterrânea, ele não pode ser usado como única base para distinguir minério de estéril, pois não incorpora todos os custos indiretos e riscos operacionais associados (McFadyen *et al.*, 2024).

2.4 Critérios geotécnicos e estabilidade de escavações

A avaliação geotécnica do maciço rochoso é essencial para o planejamento e a operação segura de minas subterrâneas. A classificação geomecânica permite traduzir as características geológicas da rocha em parâmetros numéricos utilizados para prever o comportamento estrutural e selecionar o tipo de suporte necessário em escavações. O sistema *Rock Mass Rating* (RMR), amplamente aplicado em escavações de túneis de minas, considera fatores como resistência da rocha intacta, espaçamento e condição das juntas, presença de água e orientação das descontinuidades. Essa classificação é usada para estimar a estabilidade e orientar o dimensionamento de galerias e câmaras subterrâneas (Bieniawski, 1976).

Outro método amplamente utilizado é o *Q-System*, desenvolvido por Barton *et al.* (1974), que quantifica a qualidade do maciço por meio de uma relação entre parâmetros como o índice de qualidade da rocha (RQD), número e condição das juntas, presença de água e fatores de tensão. O método Q é eficaz para prever o comportamento de escavações e definir a necessidade de suporte em diferentes tipos de rochas. Esses sistemas empíricos oferecem estimativas rápidas e práticas, sendo fundamentais nas fases de projeto e execução da lavra subterrânea (Santos, Silva, Da e Brito, 2018).

Embora os métodos RMR e Q sejam amplamente aceitos, estudos recentes ressaltam que eles apresentam limitações em minas profundas, onde as tensões geológicas e o fraturamento são mais intensos. Esses sistemas devem ser complementados com análises numéricas tridimensionais para representar de forma mais realista as condições do maciço. A integração entre os métodos empíricos e a modelagem computacional permite prever deformações e otimizar o uso de suportes, o que resulta em maior segurança e menor custo operacional (Wang *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2024).

2.5 Método de lavra subterrânea – *Sublevel Stopping*

O método *Sublevel Stopping* (ou realce em subníveis) é amplamente utilizado em depósitos com corpos de minério subverticais, contínuos e de espessura intermediária, de preferência regulares, sendo reconhecido pela sua alta produtividade e relativa simplicidade operacional. O método é recomendado para maciços rochosos de boa qualidade geotécnica, que possam manter câmaras abertas sem suporte artificial imediato (Silva, 2024).

Esse método baseia-se na perfuração e detonação de painéis de minério entre níveis de lavra previamente desenvolvidos, denominados subníveis, permitindo o desmonte por etapas verticais sucessivas (Hustrulid e Bullock, 2001). A lavra é executada geralmente de cima para baixo (*top-down*) ou de baixo para cima (*bottom-up*), dependendo da variante. Após o desmonte, o minério fragmentado é recuperado por gravidade e carregado por carregadeiras de perfil rebaixado, LHD (*Load-Haul-Dump*) em caminhões por travessas, galerias de transporte, vagões correias ou esquipas em poços diretamente para a superfície (Silva, 2024).

O *Sublevel Stopping* apresenta baixo custo unitário operacional, comparado ao corte e enchimento, mas exige alto grau de mecanização, sendo apropriado para lavra em grandes volumes. O processo requer a escavação de rampas ou poços e galerias horizontais em cada subnível, que servem de acesso para perfuração e detonação, conforme Figura 2. A diluição e a recuperação do minério dependem da precisão da perfuração e do controle da fragmentação, tornando essencial o monitoramento das operações de carregamento e enchimento (Hartman e Mutmansky, 2002).

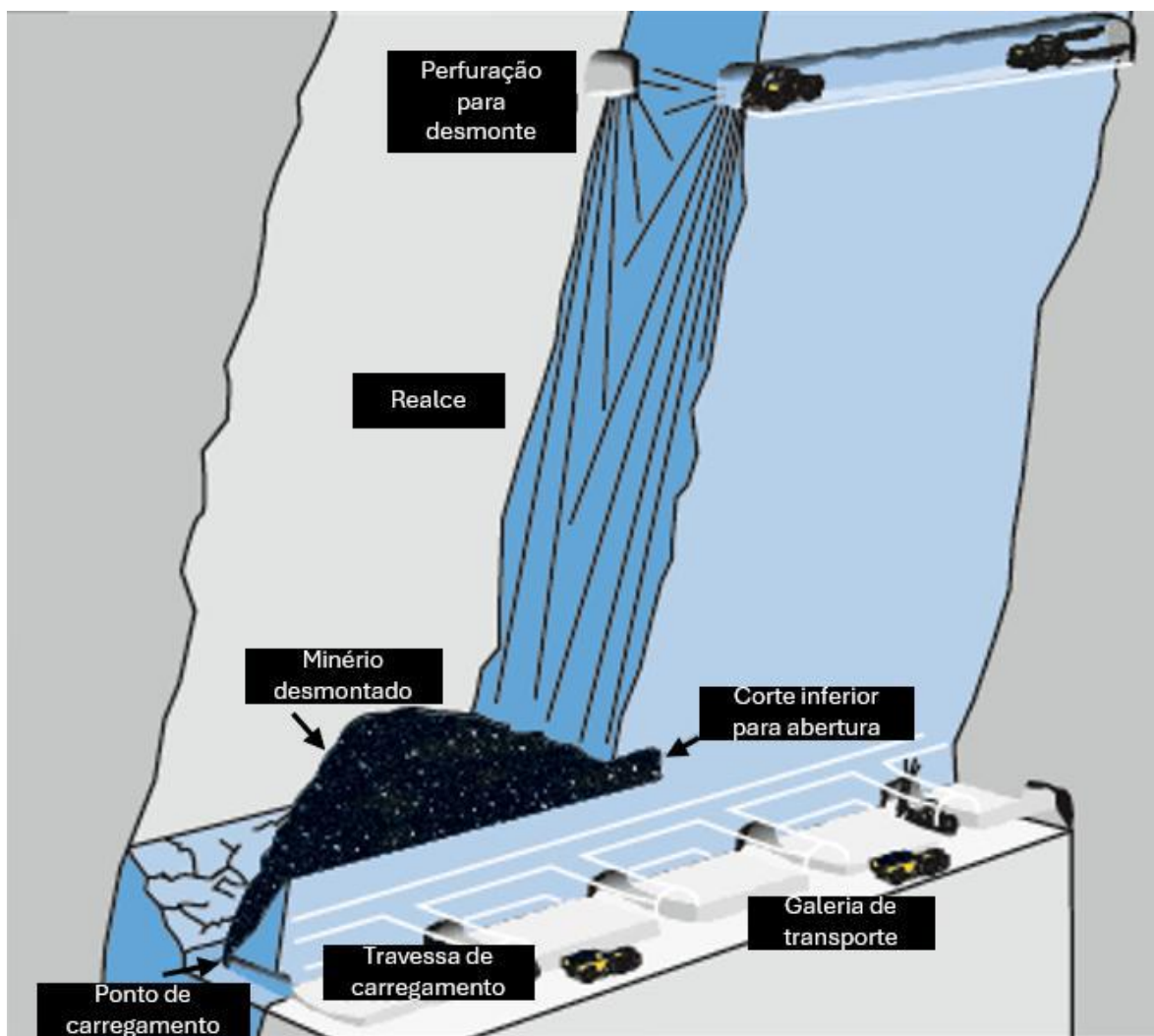


Figura 2: Perfuração de furos longos com realce em subníveis.

Fonte: (adaptado de Atlas Copco, 2010).

O aumento de capacidade de equipamentos de carga e transporte passou a viabilizar empreendimentos que antes eram impensáveis, pois o poder de movimentação passou a possibilitar a lavra de baixos teores (Silva, 2024).

Nos últimos anos, o *Sublevel Stopping* tem sido aprimorado por meio da introdução de tecnologias digitais, sistemas automatizados de perfuração e modelagem tridimensional. *Softwares* especializados, como Deswik, Datamine e Mine24D, permitem planejar e simular o desmonte de cada *stope*, otimizando o espaçamento entre furos e a sequência de lavra. Essas ferramentas possibilitam reduzir custos e aumentar a recuperação global, principalmente quando integradas com análises econômicas baseadas em *Net Smelter Return* (NSR). O método continua sendo uma das principais alternativas para minas subterrâneas de médio e grande porte, equilibrando produtividade, segurança e economia (Sotoudeh *et al.*, 2020).

2.6 Infraestrutura subterrânea e *softwares* de planejamento

A infraestrutura subterrânea de uma mina compreende o conjunto de obras e instalações que permitem o acesso e operações como a ventilação, a drenagem e o transporte do minério. Os principais componentes incluem rampas de acesso, galerias de transporte, poços de ventilação, câmaras de bombas, subestações elétricas e reservatórios (*sumps*) (McPherson, 1993). O autor destaca que o correto dimensionamento desses elementos é determinante para a eficiência e a segurança das operações, devendo considerar parâmetros geotécnicos, produtivos e ambientais. Em minas com o método de lavra *Sublevel Stopping*, a infraestrutura é projetada para suportar altas taxas de produção e permitir a movimentação contínua de minério entre subníveis, o que exige precisão geométrica e bom planejamento de ventilação.

O uso de ferramentas computacionais tornou-se indispensável para otimizar o traçado de rampas, galerias, câmaras e sistemas de ventilação, reduzindo o tempo de projeto e aumentando a precisão na estimativa de custos. O avanço desses sistemas permite testar diferentes cenários de lavra e avaliar alternativas de infraestrutura antes da execução, contribuindo para decisões técnicas mais seguras e economicamente eficientes (Hustrulid e Bullock, 2001).

Entre as soluções mais amplamente utilizadas destaca-se o Deswik, um conjunto de *softwares* voltado para o planejamento e gestão de minas subterrâneas e a céu aberto. Desenvolvido pela empresa multinacional Deswik, o sistema integra ferramentas que permitem modelar, planejar e otimizar projetos de lavra com alto nível de precisão e interoperabilidade. Suas aplicações abrangem desde a engenharia de mina até a gestão de produção, com módulos dedicados a planejamento de curto, médio e longo prazo. O Deswik.CAD, principal módulo do conjunto, é utilizado para a elaboração de *layouts* tridimensionais, cálculo de volumes, definição de câmaras e rampas, além da geração de indicadores técnicos e econômicos que subsidiam a tomada de decisão. O *software* se destaca por sua capacidade de integrar geologia, geotecnia e economia em um ambiente único de modelagem, garantindo planos de lavra consistentes, transparentes e viáveis (Deswik, 2025; Tôres, 2024).

2.7 Depósito Polimetálico de Aripuanã – MT

O depósito mineral de Aripuanã, localizado no norte do estado do Mato Grosso, Figura 3, integra o distrito polimetálico de mesmo nome e é um dos principais empreendimentos de

mineração subterrânea em operação no Brasil. O depósito situa-se a aproximadamente 700 km a noroeste de Cuiabá, apresentando reservas expressivas de zinco, chumbo, cobre, prata e ouro. O projeto foi concebido como uma mina subterrânea de alta mecanização e longa vida útil, com operação prevista para mais de 20 anos e produção baseada em métodos de lavra do tipo *Sublevel Stopping* e *Vertical Retreat Mining* (VRM) (Barros, 2025; Oliveira, 2023).

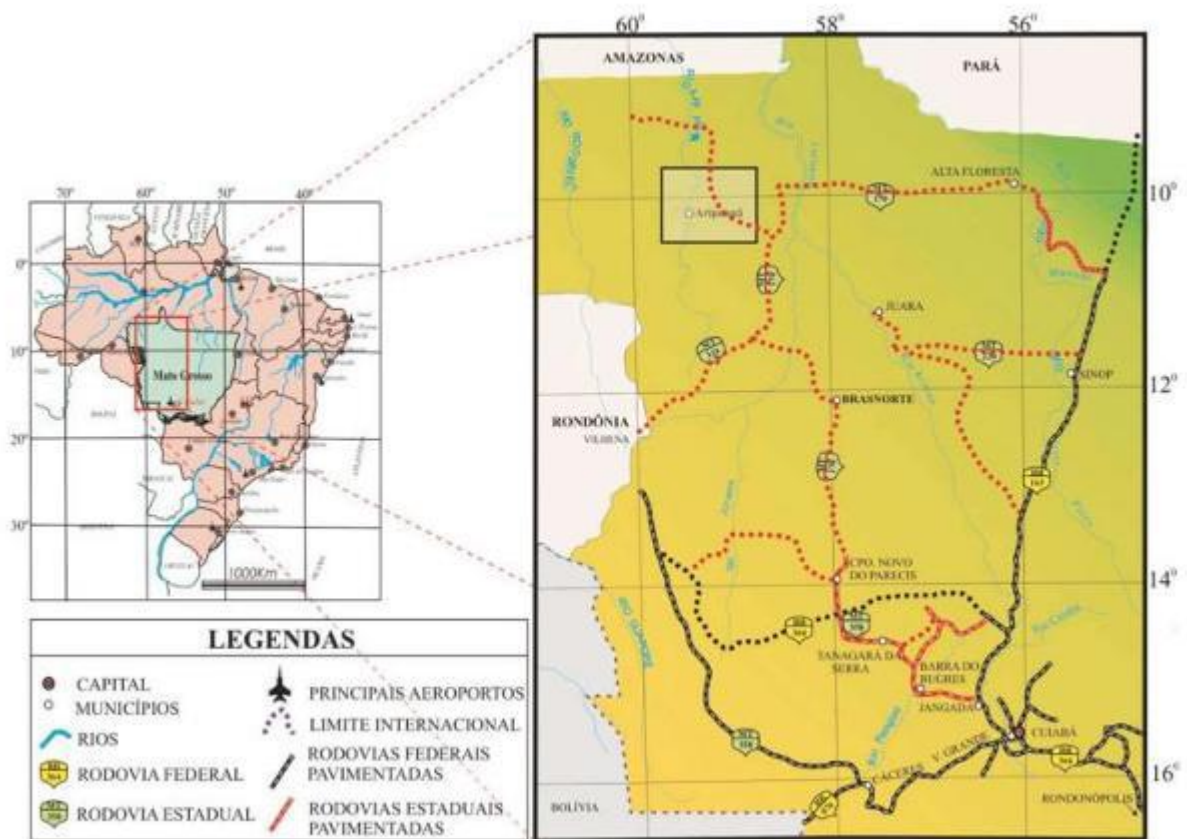


Figura 3: Localização do depósito mineral de Aripuanã.

Fonte: (Leite *et al.*, 2005).

2.7.1 Geologia e mineralização

O Depósito Aripuanã está inserido na Faixa de Aripuanã, localizada na porção norte do estado de Mato Grosso, dentro da Província Tapajós-Parima. A geologia regional é composta por rochas metavulcânicas e metassedimentares do Grupo Roosevelt, pertencente ao Domínio Alta Floresta, que integra o embasamento Paleoproterozoico da Província Amazônica. Essas rochas registram eventos de vulcanismo félsico e máfico intercalados com sedimentos finos, submetidos posteriormente a metamorfismo de baixo grau e deformações dúcteis e rúpteis. O depósito é caracterizado por zonas de cisalhamento subverticais de direção Noroeste–Sudeste,

que controlam tanto a forma dos corpos mineralizados quanto a distribuição das zonas hidrotermais associadas (Galley, Hannington e Jonasson, 2007; Leite *et al.*, 2005).

A mineralização de Aripuanã é do tipo sulfetos maciços vulcanogênicos (VHMS – *Volcanic-Hosted Massive Sulfide*), originada pela circulação de fluidos hidrotermais metalíferos em ambientes vulcânicos submarinos. O minério ocorre em lentes subparalelas e contínuas, associadas a zonas de alteração intensiva e encaixadas em metavulcânicas félsicas e intermediárias. As principais zonas mineralizadas concentram-se nos corpos Arex, Link, Ambrex e Babaçu, formados por camadas de minério maciço e disseminado, intercaladas com horizontes ricos em sílica e sulfetos. A paragênese é dominada por esfalerita, galena, calcopirita, pirita e pirrotita, com ganga composta por quartzo, sericita e clorita, além de minerais acessórios como barita e magnetita (Galley, Hannington e Jonasson, 2007; Leite *et al.*, 2005).

O controle da mineralização está fortemente relacionado à estruturação tectônica e à alteração hidrotermal. O sistema mineralizado apresenta zonas de alteração sericítica, clorítica e silicosa, que indicam uma transição entre a fase de deposição e a de substituição tardia de sulfetos. As características estruturais, como falhas reversas e dobras apertadas, condicionam a geometria dos corpos e influenciam o comportamento geotécnico do maciço, aspectos considerados no dimensionamento da lavra e no uso de enchimento cimentado (*pastefill*) para controle de estabilidade. Essa combinação de ambiente vulcano-sedimentar, forte controle estrutural e alteração hidrotermal zonada caracteriza Aripuanã como um dos mais representativos depósitos VHMS do território brasileiro (Nexa Resources, 2021; Oliveira, 2023). Observam-se na Figura 4 os corpos mineralizados.

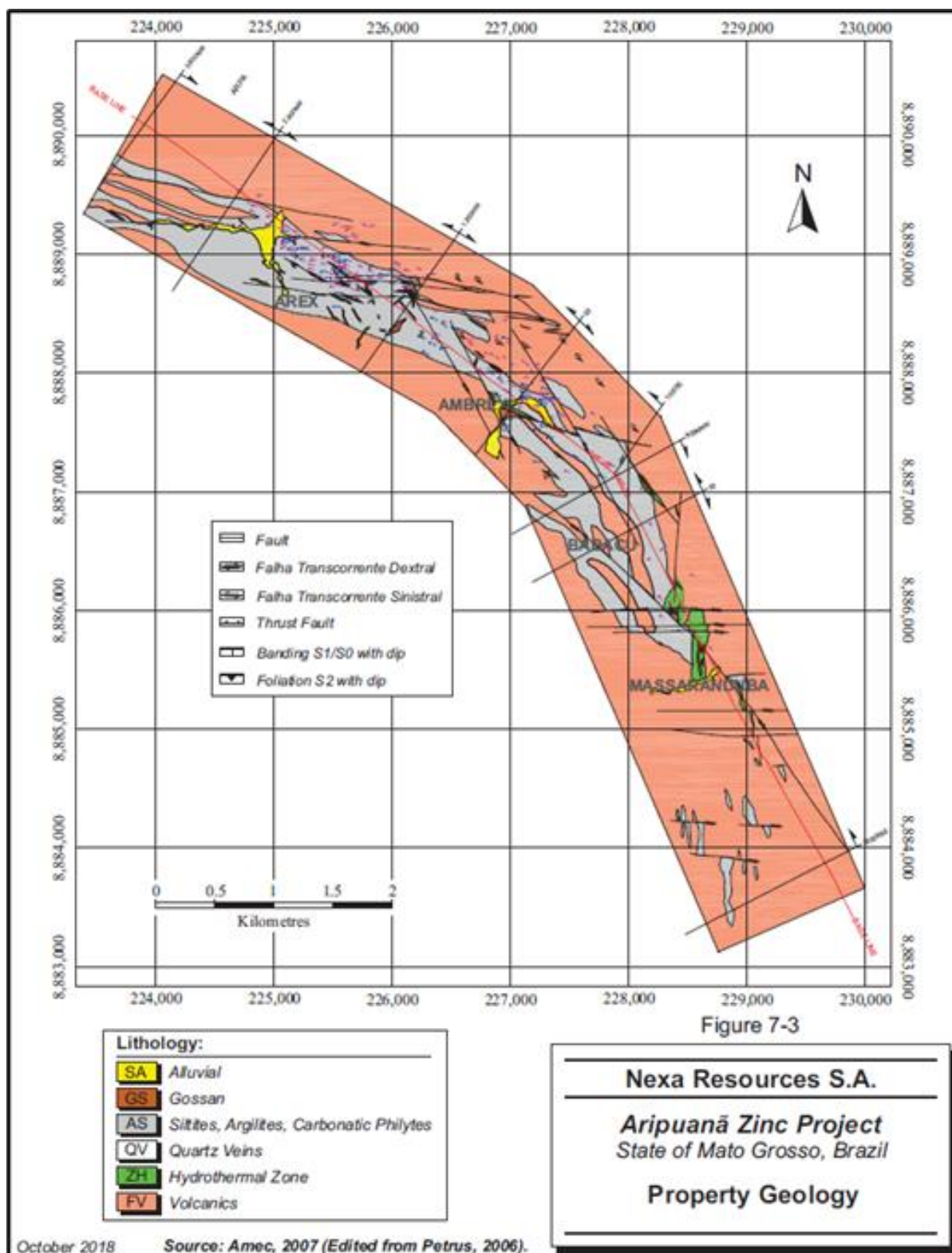


Figura 4: Mapa geológico do depósito de Aripuanã.

Fonte: (Nexa Resources, 2021).

2.7.2 Condições geotécnicas

A Mina de Aripuanã apresenta variações localizadas em função da alteração hidrotermal e da presença de zonas de cisalhamento. As rochas encaixantes do minério pertencem majoritariamente às formações metavulcânicas félsicas e intermediárias, compostas por filitos, xistos, anfibolitos e metatufos. As zonas mineralizadas, por sua vez, são compostas por sulfetos maciços e disseminados intercalados com níveis silicosos e sericíticos. O maciço foi classificado com valores médios de RMR entre 55 e 65 e Q variando de 6 a 15, o que corresponde a uma rocha de qualidade mediana a boa, adequada à aplicação dos métodos de lavra *Sublevel Stopping* e *Vertical Retreat Mining* (Nexa Resources, 2021).

A estabilidade das escavações subterrâneas está diretamente associada à estruturação geológica do maciço e ao regime de tensões atuantes. O comportamento estrutural da mina é condicionado por falhas reversas e dobras de direção NW–SE, com mergulhos médios entre 55° e 70°, que controlam tanto o formato dos corpos mineralizados quanto a orientação das galerias de lavra. A predominância de zonas de alteração sericítica e clorítica nas proximidades do minério reduz a resistência da rocha, exigindo cuidados adicionais na definição das câmaras e pilares. Ensaio realizados em testemunhos de sondagem indicam valores médios de resistência à compressão simples (UCS) entre 60 e 90 MPa, representando um maciço competente, mas sujeito a deterioração localizada nas zonas alteradas (Oliveira, 2023).

As estratégias de controle de estabilidade na mina baseiam-se no uso de suportes primários e secundários combinados com o enchimento cimentado (*pastefill*). Conforme descrito por Alves (2023), o *pastefill* é aplicado nas câmaras lavradas após o desmonte, contribuindo para o controle de deformações, redução da diluição e aumento da recuperação global do minério. Essa prática também favorece a sustentabilidade operacional, pois o material utilizado é composto majoritariamente por rejeito do beneficiamento, água e cimento (3 a 5%).

Barros (2025) complementa que o monitoramento contínuo do comportamento do maciço é realizado por meio de inspeções visuais, instrumentação geotécnica e controle de aderência entre o plano e a execução. Esses mecanismos garantem maior previsibilidade e segurança ao ciclo de lavra, reforçando a importância da integração entre planejamento, geotecnia e controle de qualidade. Observam-se na Figura 5 os tamanhos e padrões das seções conforme projeto em Aripuanã.

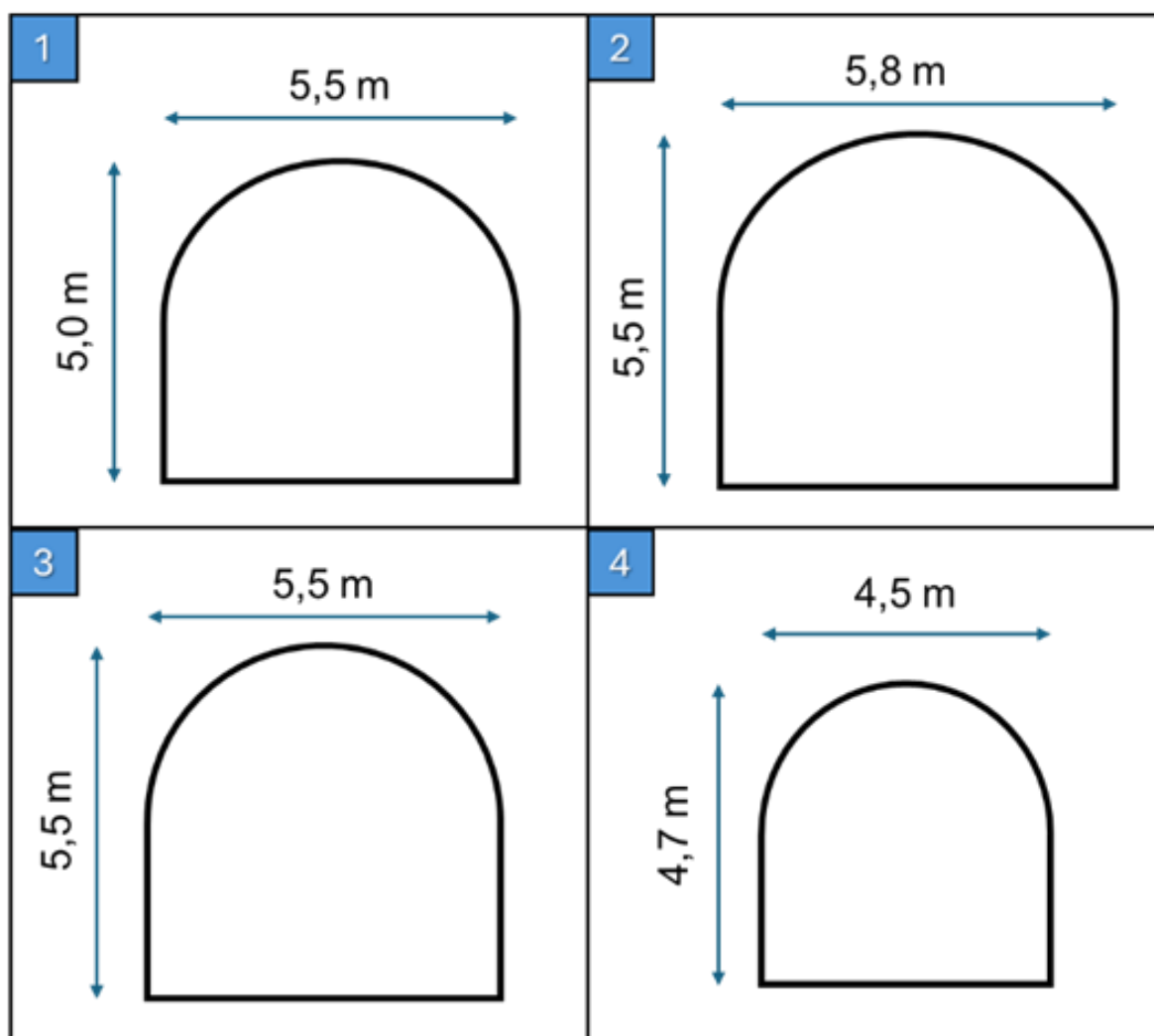


Figura 5: Perfil das escavações.

Fonte: (Nexa Resources, 2021).

2.7.3 Infraestrutura e sistemas subterrâneos da Mina Aripuanã

A infraestrutura subterrânea da Mina Aripuanã foi projetada para atender às exigências de uma operação de grande porte, totalmente mecanizada e de alta produtividade. O sistema de acesso é composto por rampas principais em espiral, que interligam os níveis produtivos e permitem o transporte de minério, pessoas e equipamentos. As rampas possuem inclinação média de 12% e seções típicas de 5,0 m de largura por 5,0 m de altura, possibilitando o tráfego de caminhões e LHDs. Cada corpo mineralizado possui uma rampa de acesso independente conectada à superfície, garantindo autonomia operacional e flexibilidade no sequenciamento de lavra. Além das rampas, o sistema inclui galerias de transporte, subestações elétricas e pontos de drenagem da água (Nexa Resources, 2021).

O sistema de ventilação da mina foi dimensionado para atender às normas de segurança ocupacional e às condições específicas de temperatura e gases oriundos do desmonte e do uso de equipamentos a diesel. A ventilação principal é do tipo forçada e exaustora, composta por ventiladores instalados em *raises*. Cada nível conta com ventiladores auxiliares e dutos flexíveis, garantindo renovação contínua do ar nas frentes de lavra. A circulação de ar é projetada para manter velocidades médias de 0,3 a 0,5 m/s e concentrações de gases abaixo dos limites regulamentares, assegurando condições adequadas de trabalho e eficiência energética (Oliveira, 2023).

Outros sistemas subterrâneos desempenham papel essencial no suporte à operação, como drenagem, suprimento de energia e introdução de *pastefill*. O sistema de bombeamento de drenagem é composto por *sumps* instalados em cada nível e por câmaras principais de bombeamento, localizadas em cada primeiro subnível, capazes de remover a água acumulada durante o desmonte e o enchimento. O sistema elétrico é alimentado por subestações subterrâneas com transformadores de 13,8 kV, distribuindo energia a equipamentos e ventiladores por meio de cabos protegidos em canaletas. Esses sistemas são monitorados por meio de painéis digitais e rotinas de controle de qualidade, o que garante a aderência entre o planejamento e a execução e minimiza riscos operacionais (Alves, 2023; Barros, 2025).

2.7.4 Métodos de Lavra Aplicados em Aripuanã

A Mina Aripuanã adota dois métodos principais de lavra subterrânea, o *Sublevel Stoping* (na variação *Bench Stoping*, aqui abreviada BS) e o *Vertical Retreat Mining* (VRM), também considerado variação por Silva, (2024), definidos conforme as condições geotécnicas, estruturais e geométricas dos corpos mineralizados. Ambos os métodos são altamente mecanizados, aplicados em corpos de minério subverticais e contínuos, com espessuras médias a grandes (6-15 m, segundo (Aires, 2025)) e rochas encaixantes de boa qualidade. A escolha entre os métodos é feita a partir de critérios como resistência do maciço (RMR), altura do painel, diluição esperada, recuperação e necessidade de enchimento (Nexa Resources, 2021).

2.7.4.1 Sublevel Stoping (Bench Stoping)

O método *Sublevel Stoping*, na variação *Bech Stoping*, é empregado nas porções do depósito que apresentam rocha de alta competência e boa continuidade estrutural. Esse método baseia-se na abertura de subníveis horizontais espaçados entre 15 e 25 m, a partir dos quais são

realizadas perfurações longas e desmontes sucessivos de câmaras verticais, Figura 6. O minério fragmentado é removido por gravidade até galerias de transferência e transportado por equipamentos LHD e caminhões até os pontos de descarga (Hustrulid e Bullock, 2001). Em Aripuanã, o método é aplicado principalmente nos corpos Arex e Link, garantindo elevada produtividade e boa recuperação do minério. A diluição é controlada por meio da precisão na perfuração e do sequenciamento das câmaras, com recuperações médias entre 85% e 90% (Nexa Resources, 2021).

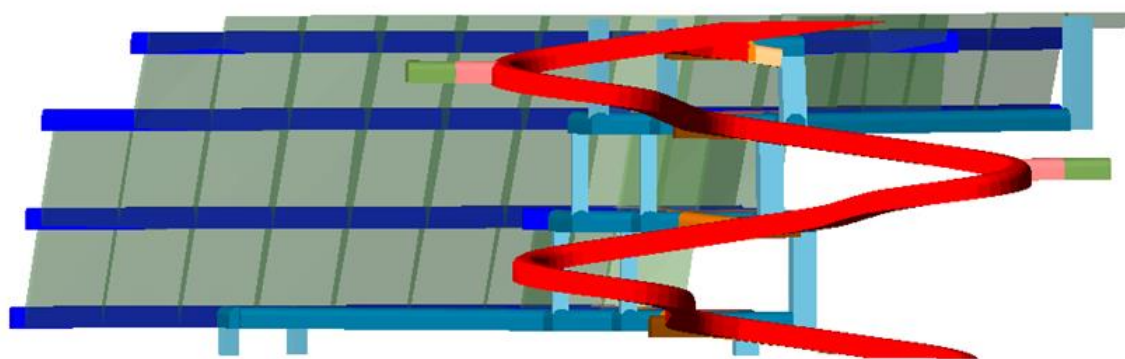


Figura 6: Escavações de um nível no Método *Sublevel Stopping*.

Fonte: (Autor, 2025).

2.7.4.2 *Vertical Retreat Mining (VRM)*

Já o método VRM, Figura 7, é um método de lavra em que o realce é delimitado por um nível superior e inferior, onde a geometria do corpo e as tensões do maciço exigem maior controle de estabilidade. O VRM consiste em uma lavra vertical ascendente, em que o minério é desmontado em fatias horizontais sucessivas de baixo para cima. Após o desmonte de cada fatia, o vazio gerado é preenchido com enchimento cimentado, utilizado na empresa com rejeito gerado pela planta uma porcentagem específica de cimento (*pastefill*). O método apresenta recuperação superior a 90%, diluição reduzida e maior sustentabilidade ambiental, por promover o reaproveitamento de rejeitos como material de suporte. Essa técnica também reduz subsidência e custos de suporte secundário, sendo fundamental para garantir a estabilidade global do maciço rochoso na Mina Aripuanã (Alves, 2023; Oliveira, 2023).

Conforme Amaral, (2024) os tirantes preenchidos com resina representam o reforço principal para as escavações em desenvolvimento. Eles são representados por barras de aço

ovalizadas com comprimento de 2,4 m e diâmetro nominal de 22 mm, com resistência à tração de 25 tf.

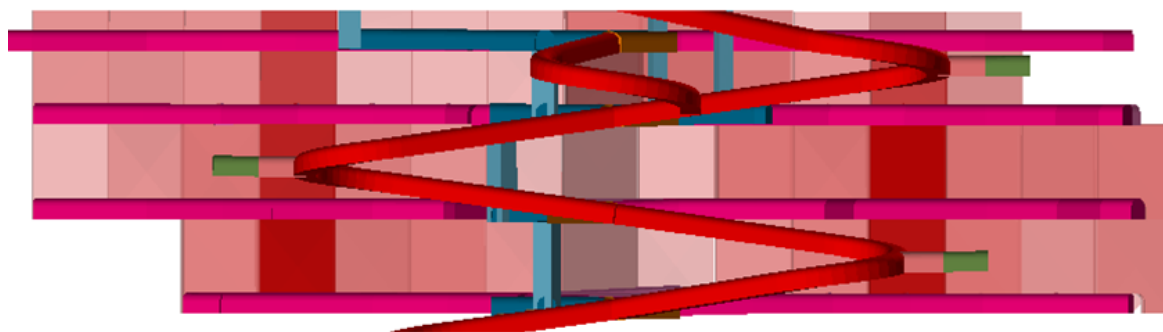


Figura 7: Escavações de um nível no Método *Vertical Retreat Mining*-VRM.

Fonte: (Autor, 2025).

2.7.5 Planejamento e *design* de longo prazo

O planejamento de longo prazo tem como objetivo definir as estratégias que orientam o desenvolvimento e a lavra de toda a vida útil da mina, buscando maximizar o aproveitamento econômico dos recursos minerais de forma segura e sustentável. De acordo com Hustrulid e Bullock (2001), o planejamento estratégico subterrâneo deve integrar fatores geológicos, geotécnicos, econômicos e ambientais, estabelecendo a sequência de lavra, o método aplicado e o posicionamento da infraestrutura principal. Na Mina Aripuanã, esses parâmetros são consolidados em um modelo digital tridimensional, que combina os resultados da modelagem geológica, do modelo de blocos com valores econômicos e das análises geotécnicas de estabilidade. Essa integração permite a elaboração de planos que maximizam o valor econômico do depósito e reduzem riscos operacionais, considerando ainda aspectos de ventilação, drenagem e sustentabilidade (Nexa Resources, 2021).

O *design* mineiro de longo prazo da Mina Aripuanã é desenvolvido por meio de módulos ou sub-rotinas, do *software* Deswik.CAD, que possibilita a construção e visualização tridimensional da mina, com base nos limites econômicos e geotécnicos definidos nas etapas anteriores. Conforme Oliveira (2023), o Deswik é utilizado para projetar rampas, galerias, subníveis e câmaras de lavra, garantindo precisão geométrica e compatibilidade com os parâmetros de estabilidade definidos pelo RMR e Q. O *software* também permite aplicar diretamente os valores de NSR por bloco, gerando mapas de valor econômico e otimizando o traçado das frentes produtivas. A programação do sequenciamento de lavra e o cronograma de

produção são realizados no módulo Deswik.SCHED, o que assegura a coerência entre o planejamento de longo prazo e os planos anuais. Essa abordagem digital proporciona maior controle sobre a diluição, os custos e a produtividade, tornando o *design* mais eficiente e adaptável às condições reais da operação (Oliveira, 2023).

Segundo Resende, (2025), o plano de produção previa o maior realce do tipo VRM-Primário já planejado na história do depósito, com geometria de 30 x 20 x 76 m (altura, largura e comprimento, respectivamente), além de um realce expressivo do tipo VRM-Secundário, de 30 x 22 x 29 m, com exposição de duas paredes laterais de *cemented pastefill*. Ambos os realces tiveram desempenho conforme o esperado, com valores de *overbreak* inferiores a 5% e 15%, respectivamente.

Resende *et al.* (2025) apresentam avaliação geotécnica realizada para execução de um realce do tipo *transverse sublevel* (VRM), a partir da classificação do maciço rochoso, identificação do mecanismo de ruptura e análise de estabilidade. O realce analisado apresenta dimensões de 55 m de altura, 45 m de comprimento e 20 m de largura, totalizando cerca de 94 mil toneladas de massa planejada. Foi realizada comparação do realce planejado com o realce realizado, procedimento bastante comum em lavra subterrânea atualmente, conforme Silva (2024). A retroanálise indicou uma estrutura geológica persistente que gerou formação de cunha no teto e lateral esquerda do realce.

O resultado da escavação e performance da lavra apresentou produção de 113 mil t, desmontes com massa maior que 30 mil t, taxas de extração de 6 mil t/dia, 23% de índice de *overbreak* e 96% de recuperação de minério. Autor considera que há coerência entre os resultados obtidos pelo método empírico Gráfico de Estabilidade, tratado por Oliveira (2012), o desempenho real da lavra e o contexto de *overbreak* da mina, apesar das limitações do método empírico.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da pesquisa: natureza, abordagem e método utilizado

A metodologia adotada tem como objetivo descrever o processo de elaboração do planejamento de longo prazo para o nível 4 da Mina de Aripuanã – MT, considerando a integração entre os aspectos econômicos, geotécnicos e operacionais.

Após revisão bibliográfica e obtenção dos modelos e informações necessárias, o procedimento foi desenvolvido no ambiente digital do *software* Deswik, utilizando seus módulos Deswik.CAD, Deswik.IS e Deswik.SCHED, que permitem realizar a modelagem tridimensional, o planejamento geométrico e a análise técnico-econômica do nível de lavra em estudo.

A extensão do corpo em estudo é variada, muitas vezes chegando a muitos metros, o que viabiliza a manutenção do método VRM. É observado que em algumas regiões é mais econômica a realização dos realces por subníveis convencionais, que na mina em estudo são nomeados *Bench Stopes* (BS), dada reduzida potência da mineralização.

3.2 Análise do Modelo de Blocos e Classificação Econômica

O modelo de blocos utilizado neste estudo foi gerado pelo otimizador de *stopes* do Deswik, contendo variáveis geológicas, geotécnicas e econômicas. Cada bloco apresenta atributos como coordenadas espaciais (X, Y, Z), massa específica ou “densidade” (t/m^3), teores de metais (Zn, Pb, Cu, Ag, Au) e valor econômico. Observa-se na Figura 8 a demonstração de como os blocos são calculados pelo otimizador de *stopes* do Deswik.CAD.

Com base no valor de *cut-off* econômico, previamente definido a partir dos custos operacionais médios da mina, os blocos foram classificados em três categorias:

- lavráveis ($NSR \geq cut-off$);
- marginais (NSR igual ao *cut-off*);
- estéreis ($NSR < cut-off$).

Essa classificação foi utilizada para determinar as zonas economicamente viáveis dentro do nível 4, servindo como base para a escolha do método de lavra e o desenvolvimento subsequente.

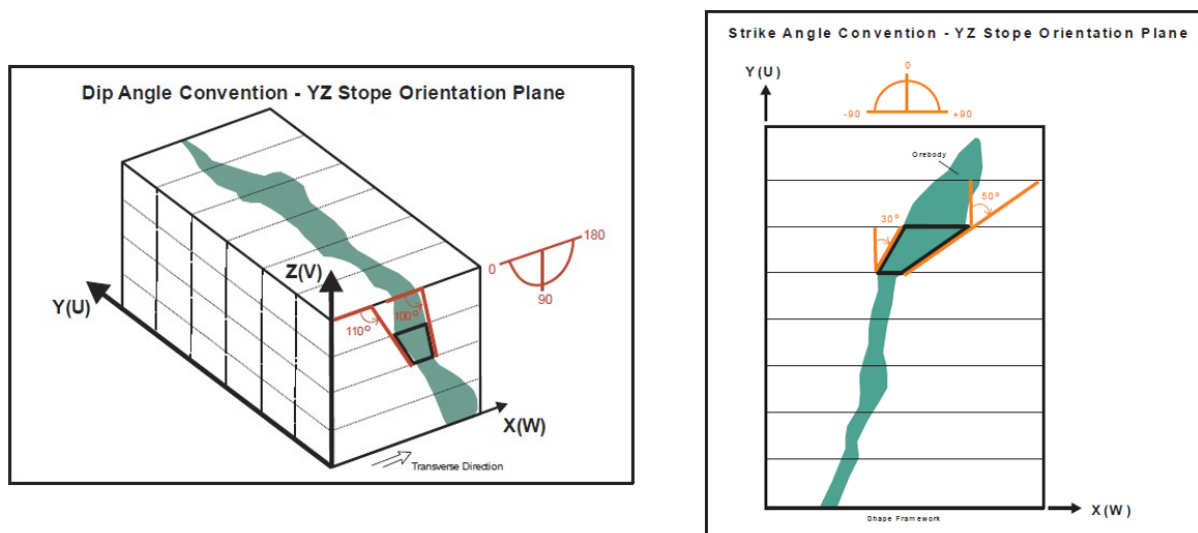


Figura 8: Demonstração de como os blocos são calculados pelo otimizador de *stipes* do Deswik.CAD.

Fonte: (Deswik, 2023).

Além dos critérios econômicos aplicados ao modelo de blocos, definidos no próprio software, foram considerados parâmetros geométricos associados à espessura da mineralização para auxiliar na definição do método de lavra. No sistema operacional utilizado, adotou-se como critério que blocos com espessura variando entre 4 m e 15 m fossem direcionados ao método *sublevel stoping*, por apresentarem geometrias compatíveis com painéis de largura. Para o método *Vertical Retreat Mining*, foram considerados blocos com espessura igual ou superior a 15 m, sem limite superior definido, sendo este valor tratado como um limite prático “infinito” no modelo, em função da capacidade do método de operar em corpos mineralizados de grande extensão vertical.

3.3 Definição do Método de Lavra

Após a análise econômica dos blocos, a zona mineralizada em estudo foi avaliada segundo critérios geotécnicos e geométricos (espessura, continuidade e RMR) para determinar o método de lavra mais adequado.

A definição do método de lavra considerou a forma como os blocos gerados pelo SO se distribuem ao longo da lente de minério. Conforme ilustrado na Figura 9, observa-se que os volumes otimizados acompanham a geometria do corpo mineralizado, resultando, em alguns setores, na sobreposição espacial entre blocos classificados para BS e VRM. Nessas situações, adotou-se como diretriz a priorização do método VRM, em função da maior espessura aparente, maior massa mineralizada e, conseqüentemente, maior potencial de recuperação e teor

associado. Entretanto, a escolha do método não foi realizada de forma pontual ou isolada por bloco, sendo necessária a avaliação integrada de todo o painel de lavra, de modo a atender às exigências geotécnicas do maciço rochoso, garantir a estabilidade regional e permitir a adequada sequência de lavra e enchimento.

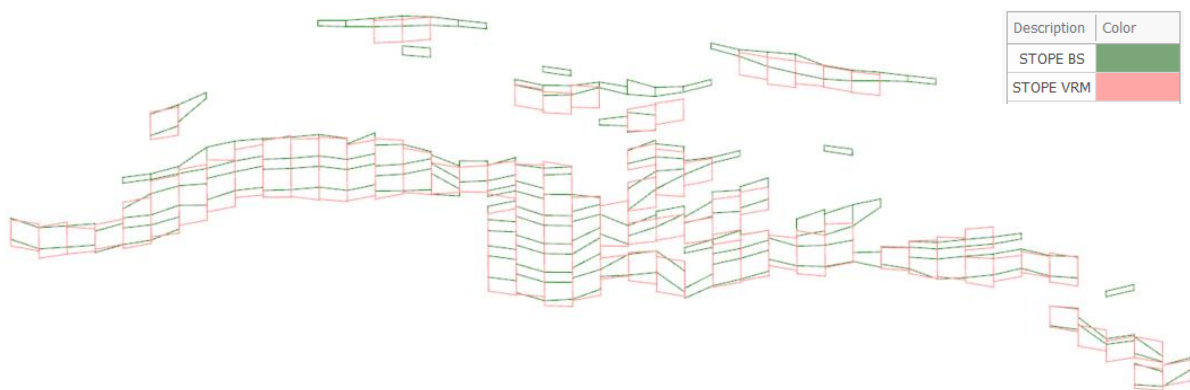


Figura 9: Distribuição dos blocos gerados ao longo da lente de minério.

Fonte: (Autor, 2025).

3.4 Planejamento do Desenvolvimento Mineiro e *Design* do Nível 4

O desenvolvimento e o *design* do nível 4 foram realizados no Deswik.CAD, com base nos resultados da análise econômica e da definição dos métodos de lavra.

As etapas incluíram:

- traçado das rampas principais, conectando o nível 4 às galerias de transporte e aos subníveis adjacentes;
- modelagem das câmaras de lavra, definindo dimensões e espaçamentos conforme o método (BS ou VRM);
- definição das galerias auxiliares, subníveis;
- alocação de *raises* de ventilação e câmaras de bombeamento.

O *design* 3D foi validado segundo critérios de estabilidade e de acessibilidade operacional, utilizando parâmetros geotécnicos médios do maciço. O modelo gerado no Deswik.CAD foi exportado para o módulo Deswik.IS para as etapas de sequenciamento e análise econômica. Observam-se na Figura 10 e Figura 11 os modelos típicos de subníveis para os métodos de lavra BS e para VRM e, na Figura 12, um nível típico, para esse projeto da mina em estudo.

Observa-se na Tabela 1 a legenda utilizada no projeto, sendo a nomenclatura utilizada no *software* Deswik e sua nomenclatura geralmente usada na literatura.

Tabela 1: Nomenclatura do *design* de projeto de longo prazo.

Nomenclatura no <i>software</i>	Nomenclatura usual	Legenda
DDH_DRIVE	Galeria de sondagem	
HAULAGE	Galeria de transporte	
ORE_ACCESS	Galeria de minério (VRM)	
ORE_DRIVE	Galeria de minério (BS)	
PUMP	Estação de bombeamento (EB)	
PWR_STATION	Subestação elétrica (SEE)	
RAISE	Chaminé	
RAMP	Rampa	
STOPE BS	Bloco de BS	
STOPE VRM	Bloco de VRM	
SUMP	Estação de drenagem	
VENT_DRIVE	Galeria de ventilação	
XCUT	Travessa (<i>Cross cut</i>)	

Fonte: (Autor, 2025).

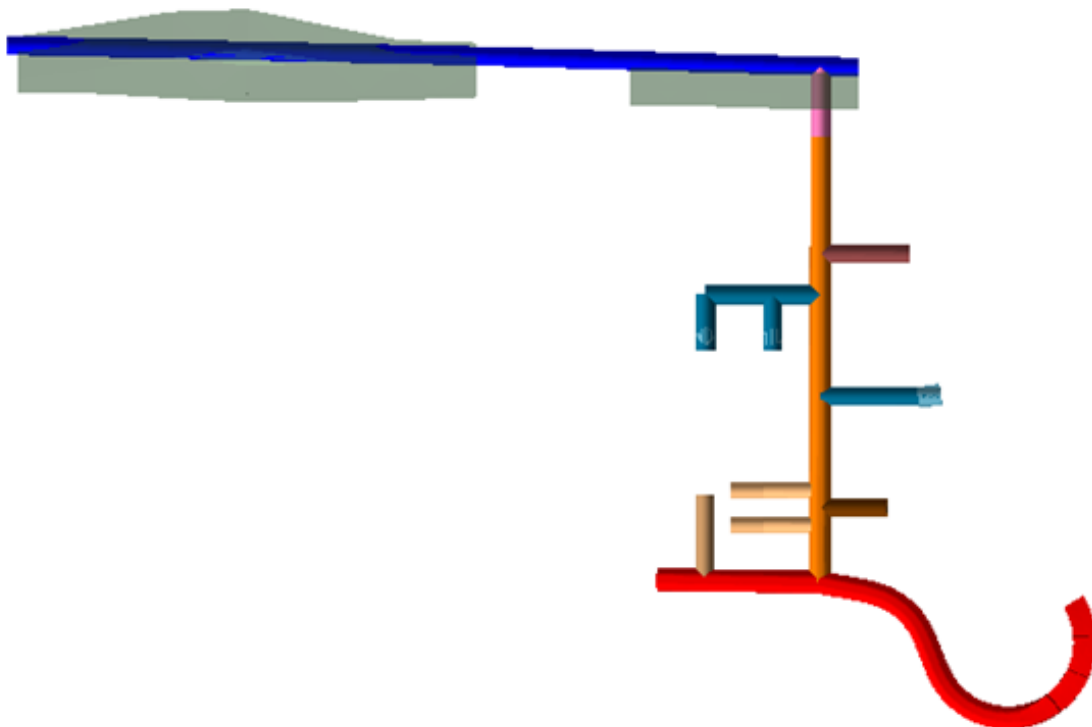


Figura 10: Visão de planta do modelo 3D de desenvolvimento de um subnível 1 típico para o método de lavra BS.

Fonte: (Autor, 2025).

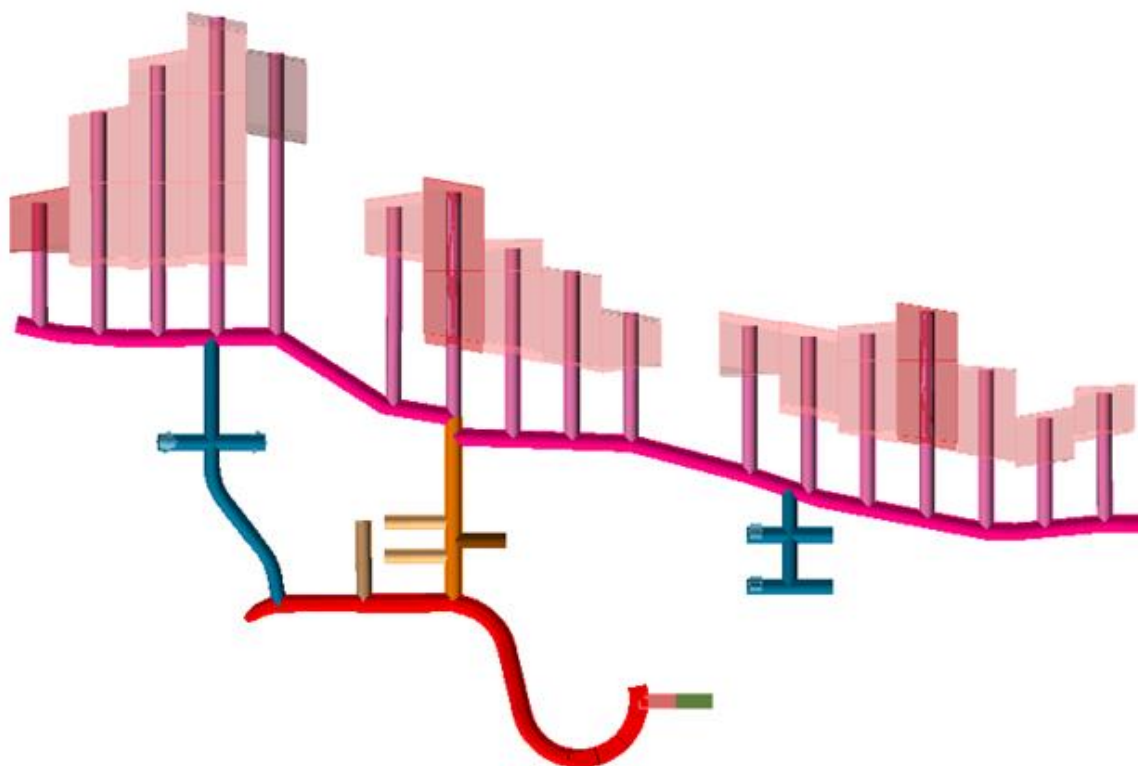


Figura 11: Visão de planta do modelo 3D de um subnível 1 de desenvolvimento típico para o método de lavra VRM.

Fonte: (Autor, 2025).

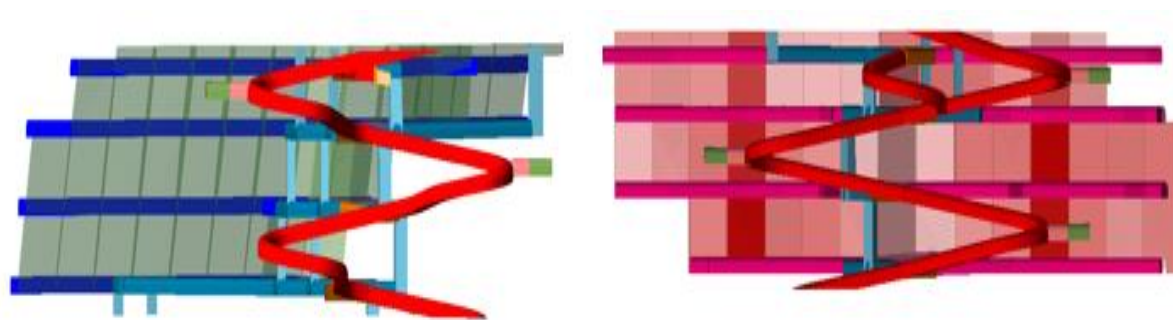


Figura 12: Visão frontal do modelo 3D de níveis típicos do projeto da mina em estudo.

Fonte: (Autor, 2025).

Para as escavações desenhadas nas Figuras 10 a 12, foram utilizados os critérios de escavação de acordo com a Tabela 2. Na Figura 13 está representado um modelo de seção de escavação, com área em m^2 e perímetro em metros.

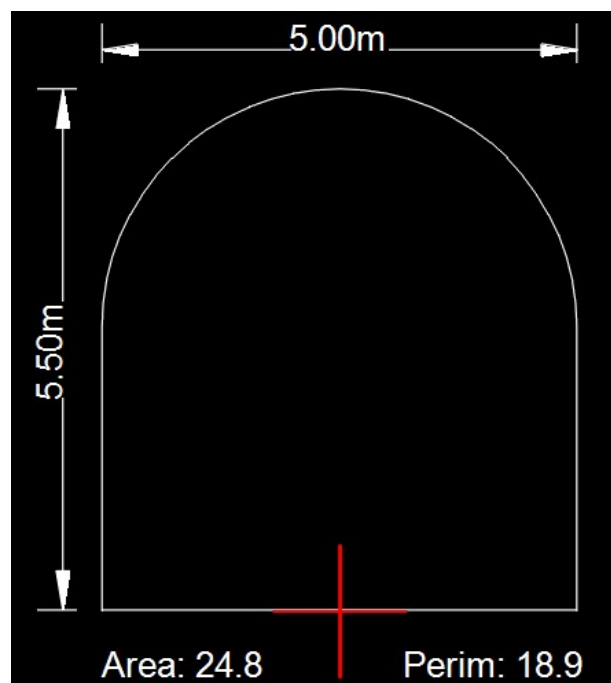


Figura 13: Seção de escavação.

Fonte: (Autor, 2025), adaptado de (Nexa Resources, 2021).

Tabela 2: Dimensões (largura x altura) das seções e gradiente das escavações.

Escavação	Seção	Gradiente
DDH_DRIVE	5,0 x 5,5 m	1%
HAULAGE	5,0 x 5,5 m	1%
ORE_ACCESS	5,0 x 5,5 m	1%
ORE_DRIVE	5,0 x 5,5 m	1%
PUMP	5,0 x 5,5 m	1%
PWR_STATION	6,0 x 5,5 m	1%
RAISE	5,0 x 5,0 m	1%
RAMP	6,0 x 5,5 m	-14%
SUMP	4,5 x 4,7 m	-16%
VENT_DRIVE	5,0 x 5,5 m	1%
XCUT	5,5 x 5,5 m	1%

Fonte: (Autor, 2025), adaptado de (Nexa Resources, 2021).

As dimensões (em m) das estruturas geotécnicas foram consideradas como se observa na Tabela 3. Na Figura 14 é demonstrado como são os pilares de um subnível.

Tabela 3: Dimensões (espessura) dos pilares para desenvolvimento e lavra.

Parâmetro (metros)	BS	VRM
Pilar entre lavra e infraestrutura principal	20	20
Pilar entre lavra e <i>raise</i>	30	50
Pilar entre galerias paralelas	*	*
Pilar entre <i>raises</i> paralelos	10	10
Pilar entre infraestrutura secundária (<i>SUMPS</i> , EBS, SE)	*	*
Pilar entre <i>raise</i> e rampa	20	20
Altura vertical do painel de lavra (4 subníveis incluídos)	80	80
Pilar entre <i>raise</i> e galeria de ventilação	6	6

*2 vezes a largura da maior escavação.

Fonte: (Autor, 2025), adaptado de (Nexa Resources, 2021)).

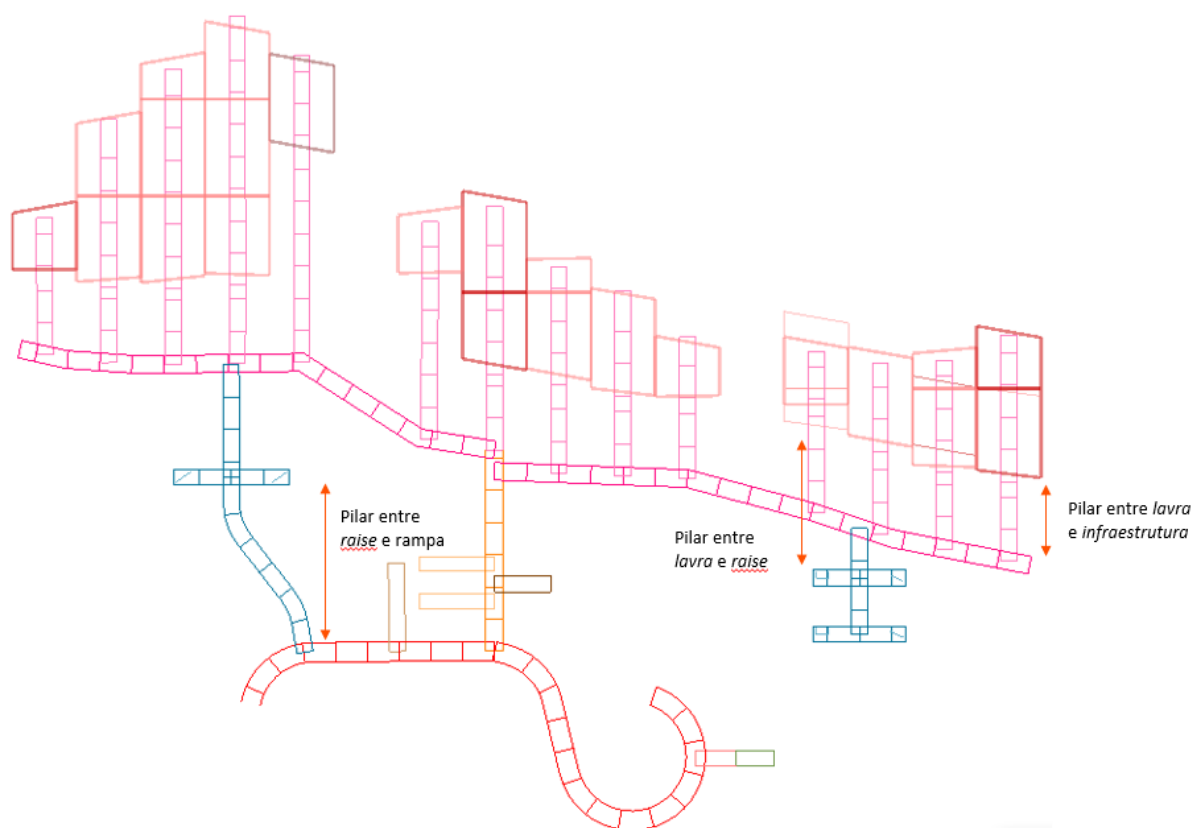


Figura 14: Demonstração das dimensões dos pilares em um subnível típico do nível 4.

Fonte: (Autor, 2025).

3.5 Projeto da Infraestrutura Subterrânea

A infraestrutura do nível 4 foi projetada de forma a garantir eficiência operacional, ventilação adequada e controle de drenagem, de acordo com as diretrizes geomecânicas de estabilidade.

Observa-se na Figura 15 a configuração geral da infraestrutura de um nível típico, composta pelos principais elementos que asseguram o funcionamento e a segurança da operação subterrânea. O sistema inclui rampa principal e travessas, que garantem o acesso e realização das operações que terminam no transporte de minério e equipamentos entre os níveis; *raises* de ventilação de exaustão e adução, responsáveis pela circulação de ar; e o *mucking bay* (MBAY), espaço destinado a manobra ou ao carregamento de caminhões. De acordo com (Soares, 2014), a disposição adequada desses pontos é essencial para otimizar o tráfego subterrâneo, evitando congestionamentos e reduzindo o tempo de ciclo dos equipamentos.

Também estão representados os *sumps*, utilizados para drenagem e bombeamento da água; a subestação elétrica, que fornece energia aos equipamentos de lavra e ventilação; e o posto de sondagem, que serve de apoio às atividades de reconhecimento e controle geológico. Esses componentes integram o modelo tridimensional desenvolvido no Deswik.CAD, garantindo coerência entre o planejamento de lavra e a infraestrutura subterrânea.

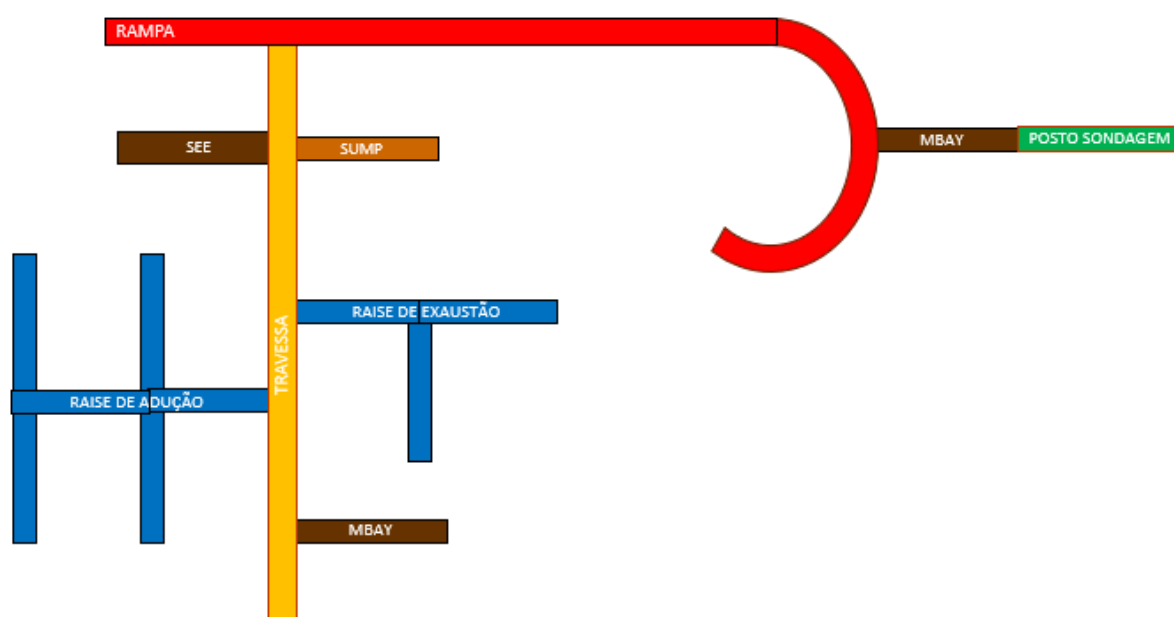


Figura 15: Modelo de infraestrutura de um subnível típico.

Fonte: (Autor, 2025).

Esses elementos foram incorporados ao modelo tridimensional, Figura 16, permitindo a visualização e o cálculo de volumes e distâncias de desenvolvimento total.

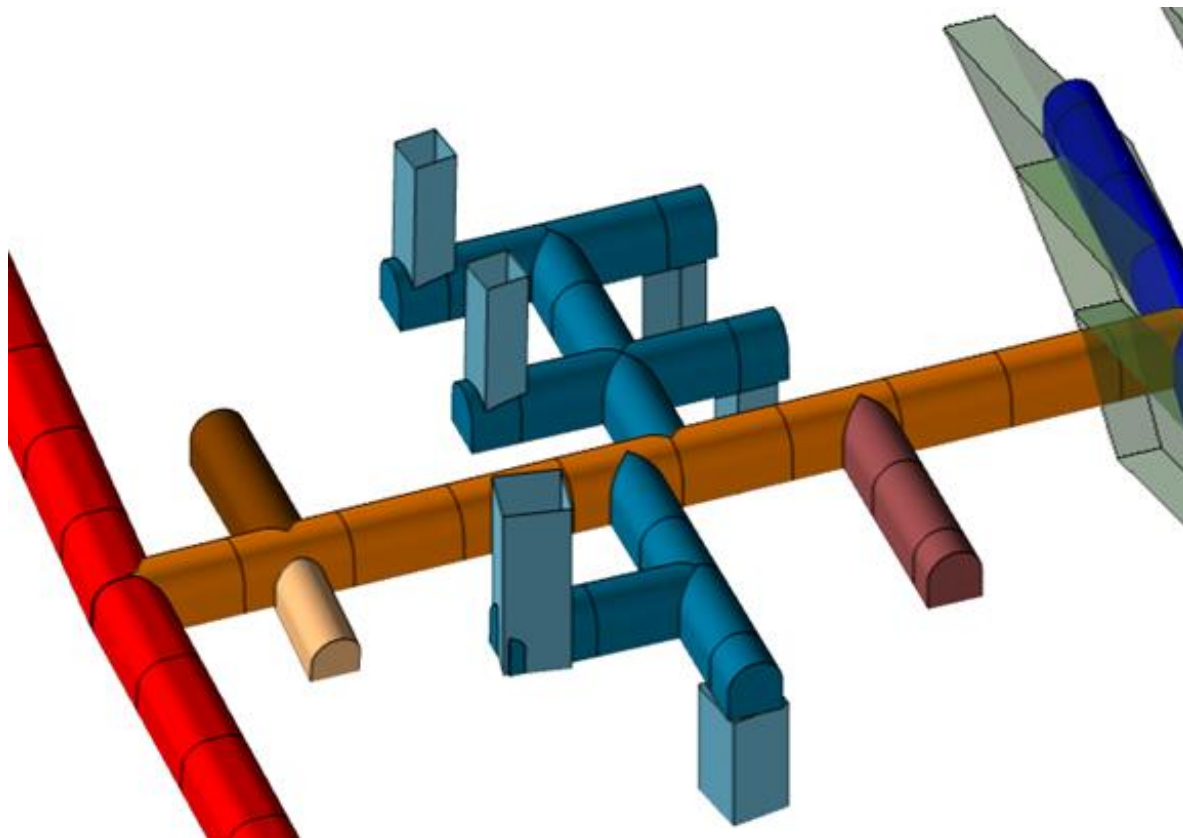


Figura 16: Modelo 3D da infraestrutura típica de um subnível.

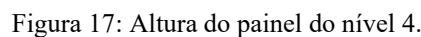
Fonte: (Autor, 2025).

3.6 Definição dos subníveis e espaçamento vertical

A definição da quantidade de subníveis e do espaçamento vertical adotado no nível 4 foi realizada com base na análise do modelo de blocos, considerando a distribuição espacial da mineralização, a altura dos painéis de lavra e os métodos de lavra aplicáveis. O espaçamento adotado também considera as limitações operacionais dos equipamentos de perfuração de furos longos e a manutenção da estabilidade dos painéis. O objetivo dessa etapa foi garantir a compatibilidade entre o desenvolvimento mineiro e a geometria do corpo mineralizado, minimizando retrabalhos e escavações desnecessárias.

O modelo de blocos foi utilizado como referência para avaliar a continuidade vertical da mineralização e a espessura média dos blocos mineralizados. A partir dessa análise, definiu-se um espaçamento vertical constante entre subníveis, de forma a permitir acesso eficiente às zonas lavráveis e adequada execução das perfurações de produção, tanto para o método

- 3 *stopes* (realces) e 1 *sill pillar* recuperável;
- Altura total do painel (com *sill pillar*): 92 m;
- Altura do realce: 25 m;
- Altura do *rib pillar*: 12 m (somando-se 17 m entre níveis;
- Dimensão seguindo o *Strike*: 20 m.



O espaçamento adotado mostrou-se compatível com a altura dos painéis de lavra planejados e com as limitações operacionais dos equipamentos de perfuração e carregamento. Essa abordagem assegura coerência entre o modelo geológico-econômico e o *design* mineiro, reforçando o caráter integrado do planejamento e reduzindo incertezas durante as etapas subsequentes de desenvolvimento e lavra.

A última etapa consistiu na análise consolidada de desempenho técnico e econômico, realizada por meio do módulo Deswik.SCHED.

39

software permitiram gerar relatórios automáticos de tonelagem, recuperação, custo total e receita líquida estimada, possibilitando a avaliação da viabilidade econômica do plano proposto para o nível 4.

4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta a aplicação prática da metodologia desenvolvida ao planejamento de longo prazo da Mina de Aripuanã, com foco no nível 4. O estudo foi conduzido utilizando os módulos Deswik.CAD, Deswik.IS e Deswik.SCHED, permitindo a integração entre modelagem geológica, análise econômica, *design* mineiro e avaliação técnico-econômica.

4.1 Análise Econômica do Modelo de Blocos

O modelo de blocos foi gerado no otimizador de *stopes* do Deswik (*Stope Optimazer*), contendo as variáveis coordenadas espaciais (X, Y, Z), densidade, teores de metais (Zn, Pb, Cu, Ag e Au) e valor econômico.

A retirada dos blocos inviáveis considerou critérios adicionais de caráter operacional e geotécnico. Quando a classificação inicial resultava em um painel de BS inserido no interior de uma região classificada como VRM, adotou-se o método VRM como prioritário, visando manter a continuidade do método de lavra, reduzir interferências operacionais no design e a oportunidade de aproveitar maior massa.

Outro critério aplicado refere-se às restrições geotécnicas, nas quais não foi permitida a configuração de três painéis paralelos consecutivos de BS, de modo a evitar condições desfavoráveis de estabilidade do maciço rochoso. Nesses casos, os blocos foram reclassificados ou removidos do planejamento, conforme a viabilidade técnica.

Por fim, excluiu-se do modelo final os blocos economicamente lavráveis, porém espacialmente isolados ou distantes das frentes principais de lavra, cuja incorporação implicaria elevado volume adicional de desenvolvimento, não compensando economicamente sua extração. A aplicação conjunta desses critérios resultou em um modelo de blocos mais consistente do ponto de vista técnico e operacional, permitindo a delimitação das regiões efetivamente lavráveis do nível.

Com base nos custos operacionais médios e nas premissas econômicas fornecidas, observa-se na Figura 18 o modelo integral de blocos, separados pelos métodos de lavra. Após o tratamento e a retirada dos blocos inviáveis para lavar, há o resultado do modelo de blocos no nível 4, Figura 19.

A análise econômica do modelo de blocos do nível 4 demonstrou uma distribuição heterogênea dos valores de NSR, concentrando as zonas de maior valor econômico nas porções centrais do corpo. A aplicação do *cut-off* econômico permitiu a classificação dos blocos em três categorias: lavráveis, marginais e estéreis. Os valores médios de NSR variaram de US\$ 49 (*cut-off*) a 329/t, sendo blocos de NSR de 49 a 60,68 considerados marginais.

Do modelo de blocos inicialmente gerado em comparação com o modelo final, houve a seleção de 18% dos blocos, considerados inviáveis para lavar por motivos econômicos, como blocos estéreis, e geotécnicos. Relativo ao método de lavra, 68% são blocos aptos para o método BS, entretanto, aproximadamente 54% da tonelagem total estão nos blocos de VRM.

Observa-se na Figura 18 o modelo de blocos gerado para o nível 4, já na Figura 19, o modelo de blocos com a aplicação dos critérios econômicos desse mesmo nível.

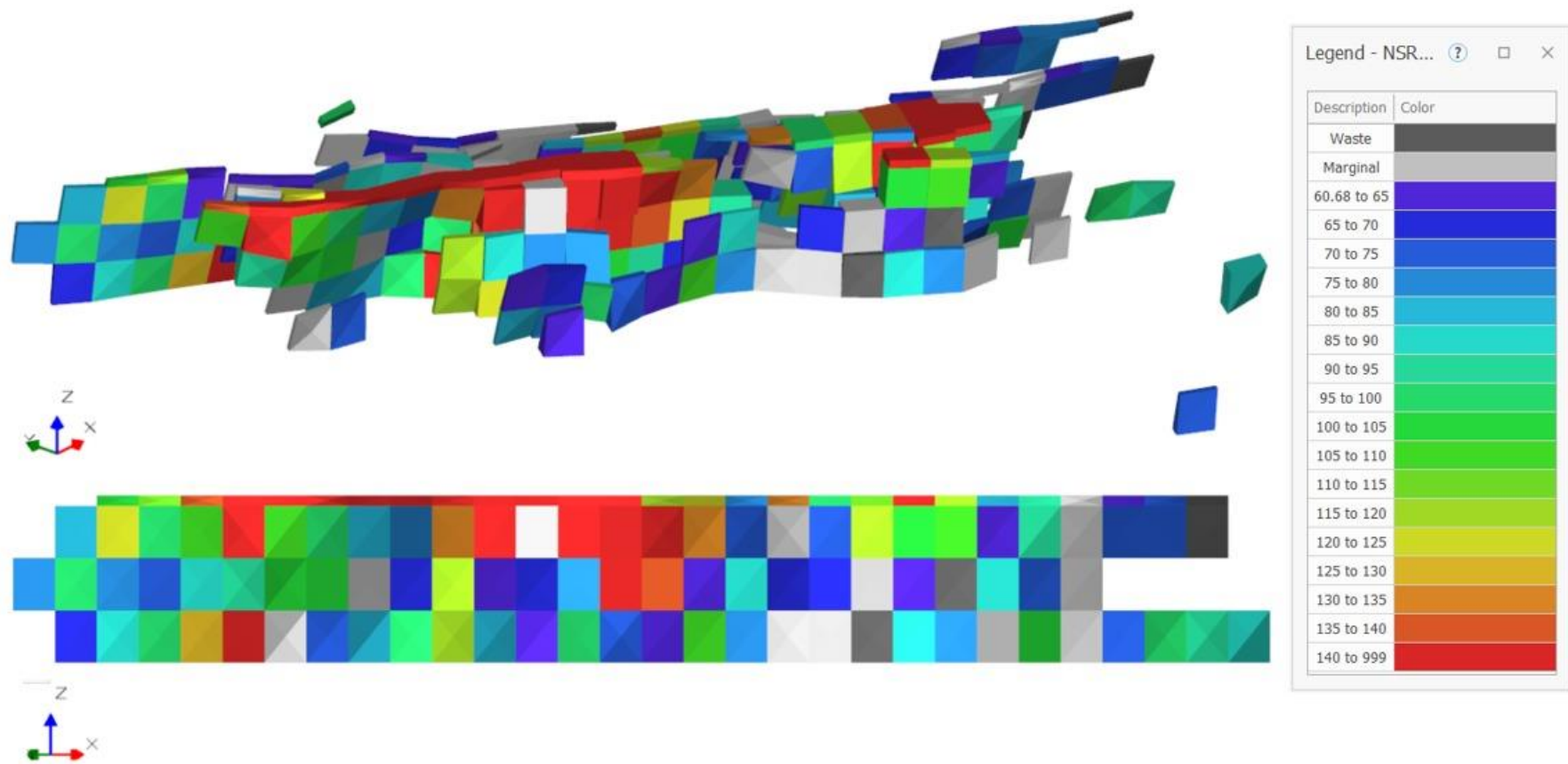


Figura 18: Modelo de blocos no nível 4 sem análise econômica.

Fonte: (Autor, 2025).

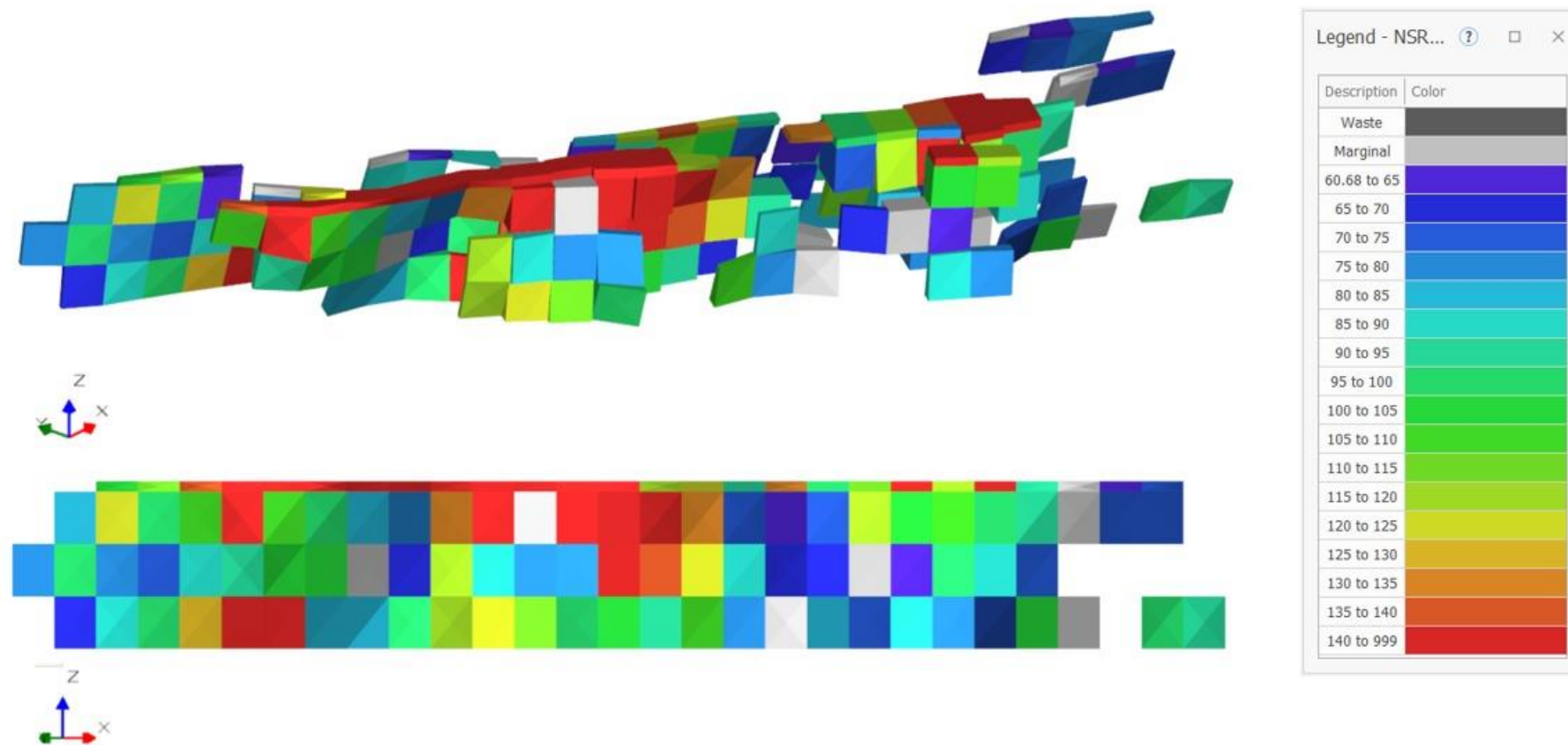


Figura 19: Modelo de blocos no nível 4 com análise econômica.

Fonte: (Autor, 2025).

4.2 Design e Infraestrutura do Nível 4

O modelo tridimensional desenvolvido no Deswik.CAD resultou em um *layout* integrado, contemplando rampas, subníveis, galerias de transporte, galerias de minério (*ore drives*) e *raises* de ventilação. A infraestrutura compreende os sistemas de ventilação, drenagem e energia, essenciais para a operação.

As rampas principais totalizaram aproximadamente 1.524 metros de desenvolvimento, conectando nas travessas, que somaram aproximadamente 368 metros, para acesso ao corpo de minério. O acesso para os blocos de VRM, pelas galerias de minério, totalizaram 4.640 metros, enquanto o acesso das galerias de minério para os blocos de BS 3.592 metros, aproximadamente 22% a menos. As galerias de minério são direcionadas a partir da galeria de transporte, que somou 1.096 metros. Já para a infraestrutura, foram dimensionados aproximadamente 2.379 metros, desses, 327 metros de escavações verticais (*raises*). A Tabela 4 demonstra o total, em metros, de cada desenvolvimento mineiro.

Tabela 4: Metragem total de desenvolvimento.

Escavação	Total (m)
<i>Meters (total)</i>	14.020,87
DDH_DRIVE	24,00
HAULAGE	1.096,28
ORE_ACCESS	4.640,04
ORE_DRIVE	3.592,01
PUMP	146,79
PWR_STATION	63,13
RAISE	327,18
RAMP	1.524,77
SUMP	185,91
VENT_DRIVE	2.052,15
XCUT	368,61

Fonte: (AUTOR, 2025).

O sistema de ventilação foi dimensionado em adução e exaustão, sendo a adução geralmente colocada nas travessas e exaustão, nas galerias de transporte, a fim de suportar toda demanda das escavações. A canaleta de drenagem foi direcionada nas rampas, a aproximadamente 14 metros de cada interseção da travessa com a rampa nos subníveis 2, 3 e 4. No primeiro subnível é localizada na travessa. A estação de bombeamento é localizada na rampa apenas no primeiro subnível, a aproximadamente 16 metros da interseção da travessa

com a rampa, sendo guiada pelos *sumps*. Já as subestações elétricas estão nas travessas em todos os subníveis.

Observa-se na Figura 20 e na Figura 21 o *design* final dos subníveis 1 e 3 do nível 4. Já na Figura 22, o *design* completo do nível 4.

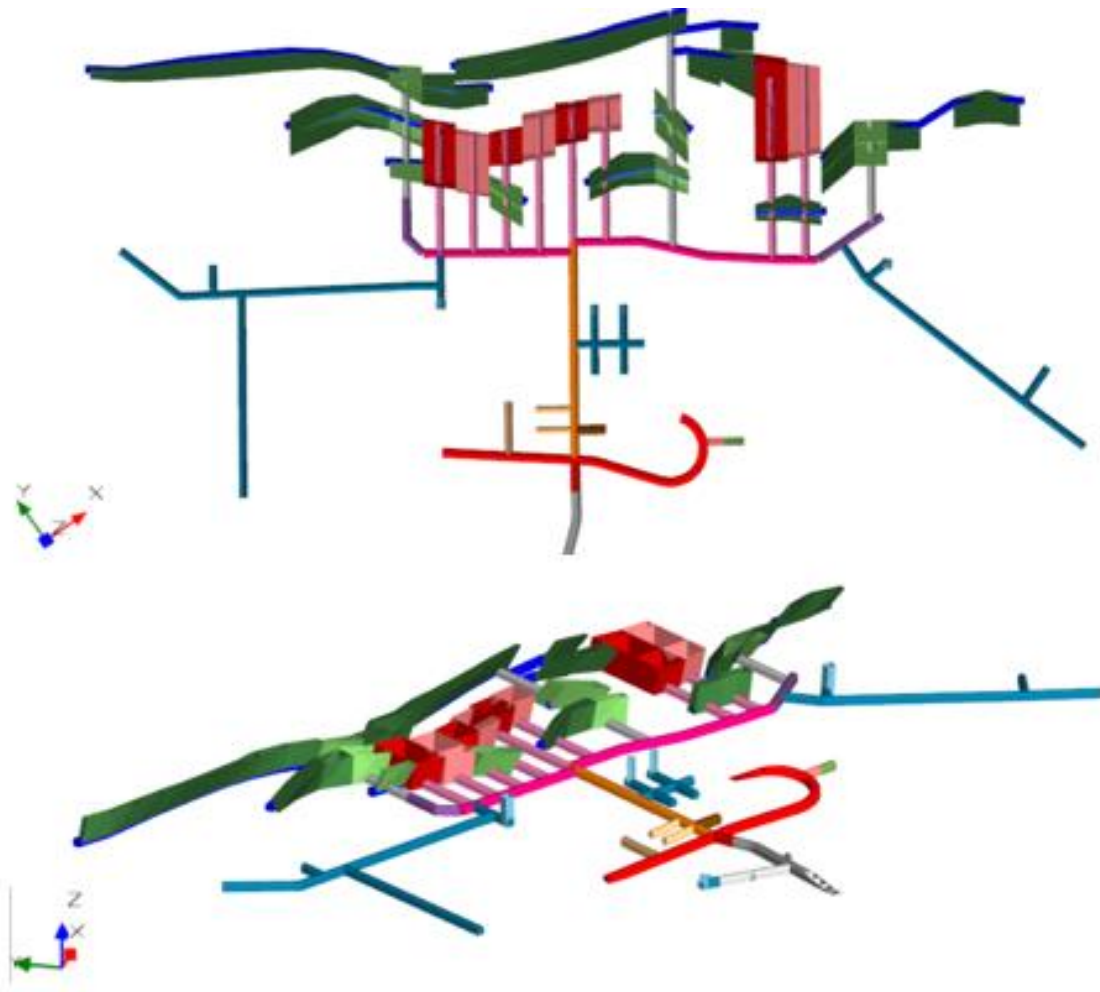


Figura 20: Arranjo (*layout*) do nível 4, subnível 1.

Fonte: (Autor, 2025).

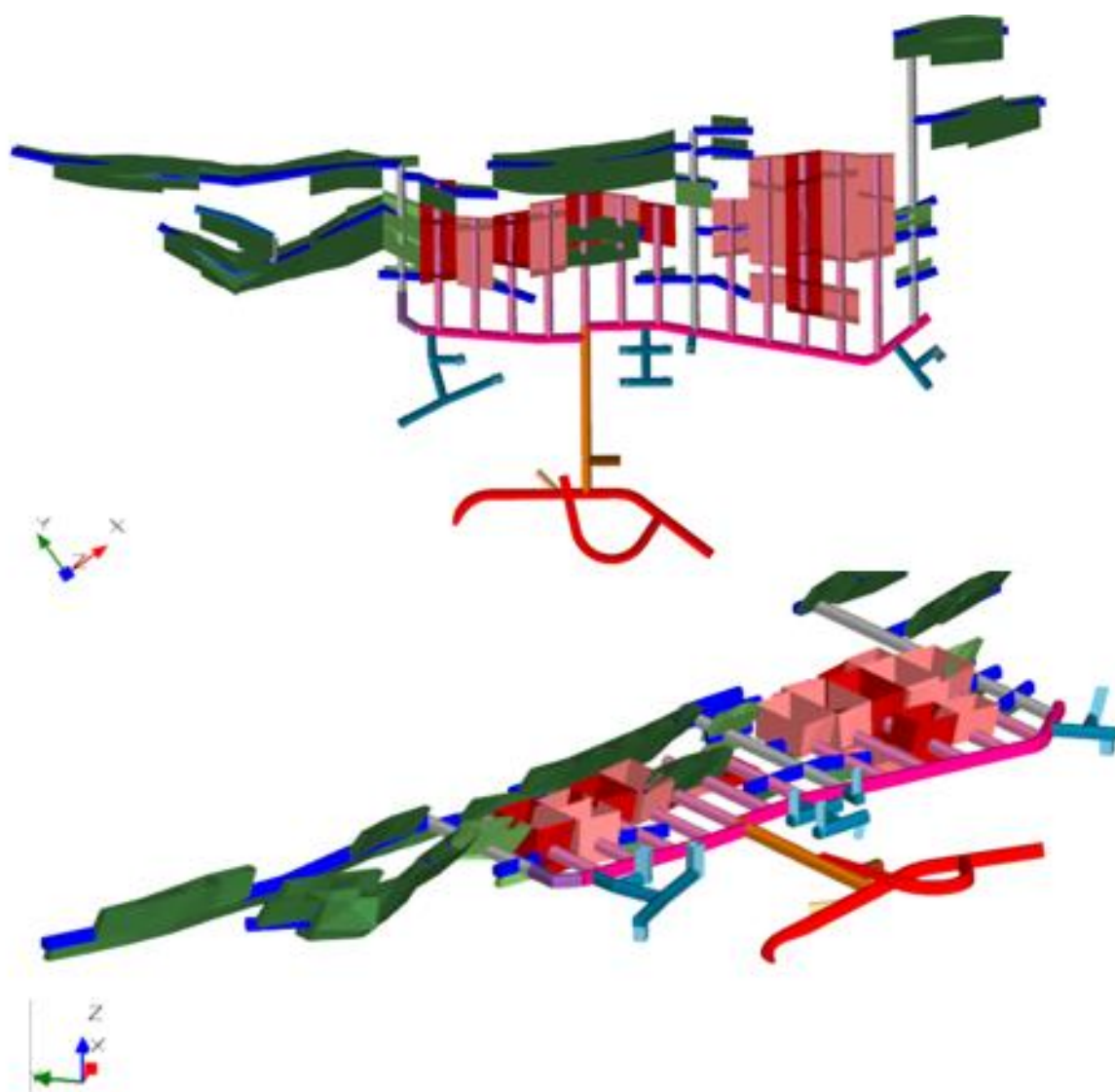


Figura 21: Arranjo (*layout*) do nível 4, subnível 3.

Fonte: (Autor, 2025).

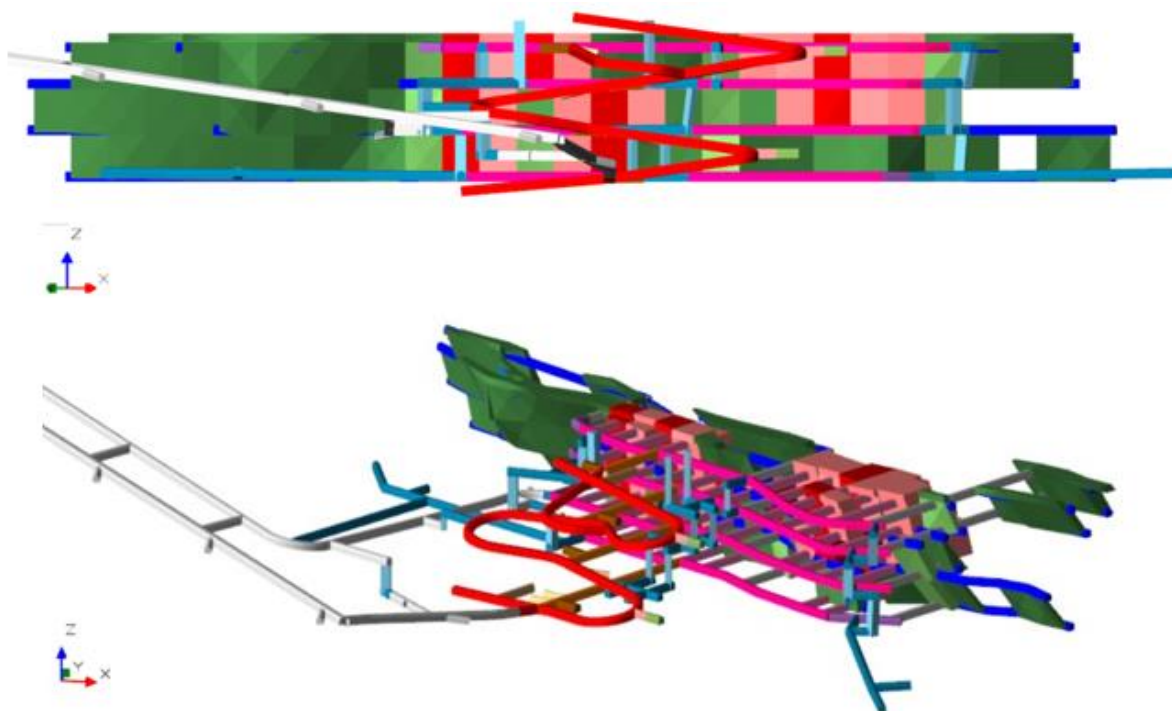


Figura 22: *Design* do nível 4.

Fonte: (Autor, 2025).

4.3 Análise Técnico-Econômica

Os resultados consolidados da simulação no Deswik.SCHED são apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6. O NSR médio do nível 4 foi de aproximadamente US\$105 /t. A produção anual simulada atingiu cerca de 3,07 milhões de toneladas, com recuperação média de 90%. A infraestrutura foi projetada para seguir a lente de minério, ou seja, dos 14,02 mil metros planejados, 30% foram considerados com aproveitamento econômico, Tabela 7. Cabe destacar que o aproveitamento econômico de aproximadamente 30% não se refere apenas à lavra dos painéis propriamente ditos, mas também indica que parte significativa do desenvolvimento mineiro ocorre no interior do veio mineralizado. Dessa forma, o desenvolvimento resulta, simultaneamente, na extração de minério, caracterizando um aproveitamento econômico durante a fase de desenvolvimento. Esse aspecto contribui para a melhoria dos indicadores econômicos do nível analisado, uma vez que reduz a proporção de escavações exclusivamente em estéril e aumenta a eficiência global do planejamento.

Os custos do projeto foram analisados a partir da distinção entre CAPEX, associado aos investimentos em desenvolvimento e implantação da infraestrutura, e OPEX, relacionado aos custos operacionais recorrentes da lavra. Essa classificação é amplamente utilizada na

avaliação econômica de projetos mineiros, pois permite compreender a distribuição dos investimentos ao longo do tempo (Curi, 2017; Hall, 2014).

Destaca-se ainda que, no planejamento de longo prazo, o custo associado ao enchimento com *pastefill* foi considerado como valor fixo por metro cúbico preenchido, independentemente de variações operacionais. Embora, na prática, fatores como distância de bombeamento, teor de sólidos, consumo de cimento e condições de infraestrutura possam gerar oscilações no custo real, optou-se pela adoção de um valor médio estabilizado para fins de modelagem estratégica.

Conforme apresentado no Figura 23, observa-se que o maior valor do CAPEX se concentraria nos anos iniciais do cronograma, especialmente entre 2025 e 2027, refletindo a fase de implantação do nível 4. A partir de 2028, esse investimento se torna residual. Em contrapartida, o OPEX passa a assumir maior relevância com o início da produção, atingindo valores mais elevados entre 2026 e 2029, acompanhando a intensificação das atividades operacionais. Esse comportamento evidencia a transição da fase de desenvolvimento para a fase produtiva da lavra subterrânea.

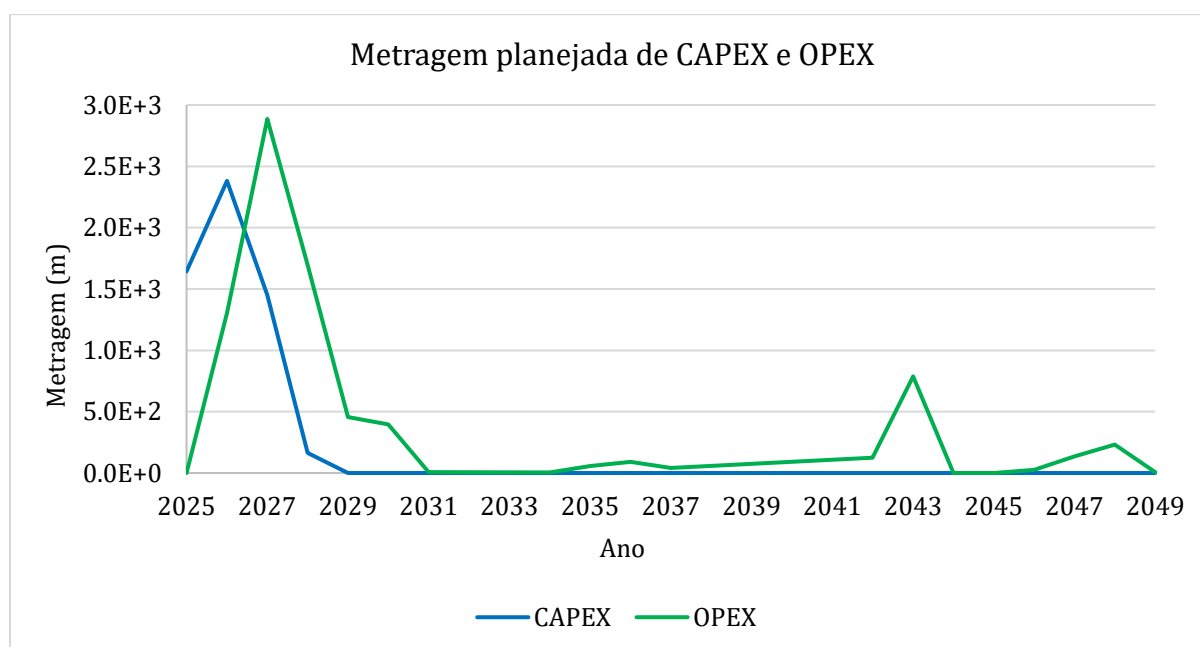


Figura 23: Evolução temporal do CAPEX e do OPEX no planejamento do Nível 4

Fonte: (Autor, 2025).

Observa-se na Figura 24 que o período inicial do projeto será marcado por maior intensidade de desenvolvimento, com ênfase em rampas, e infraestrutura dos subníveis; o que demandou investimentos mais altos e resultou em maior produção de minério nesse estágio.

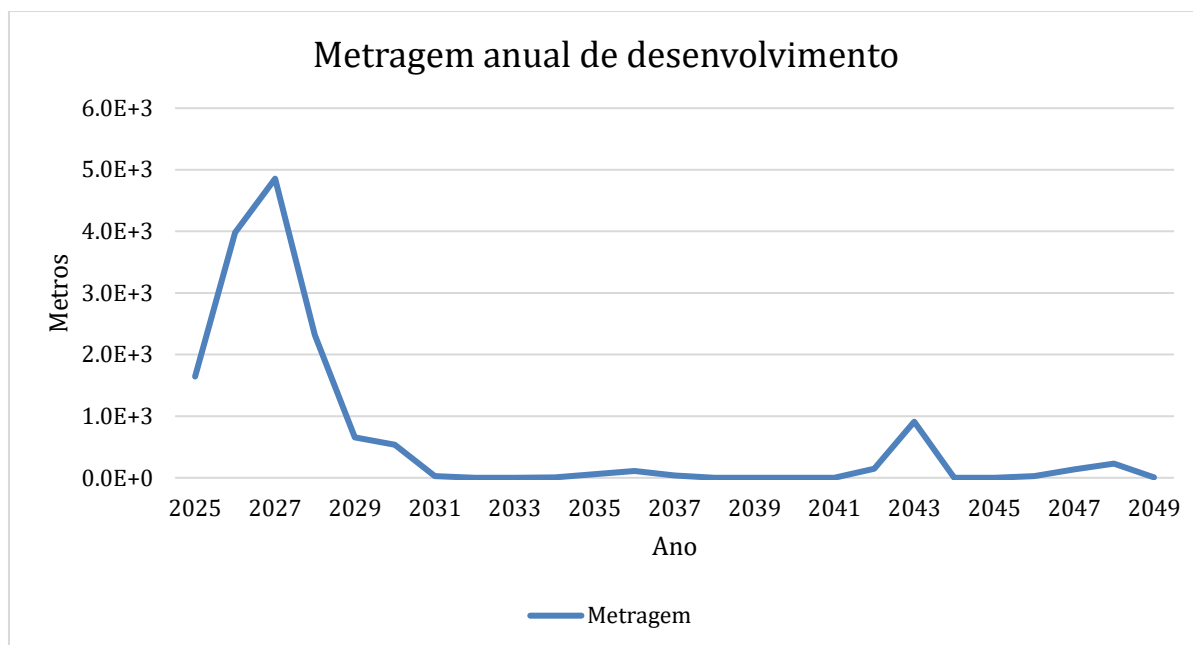


Figura 24: Metragem anual prevista de desenvolvimento mineiro.

Fonte: (Autor, 2025).

A partir de 2027, prevê-se o início da lavra plena, com aumento expressivo da produção de minério lavrável e consequente crescimento da receita operacional Figura 25.

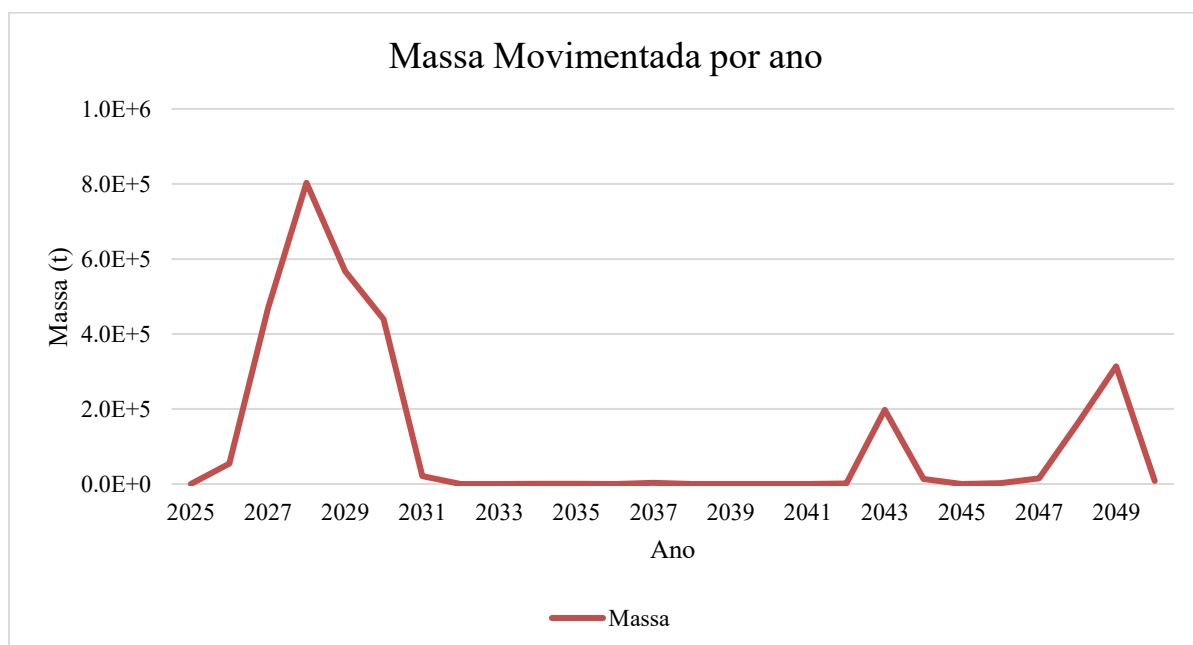


Figura 25: Massa movimentada por ano.

Fonte: (Autor, 2025).

O pico de produção está previsto para 2028, coincidindo com a conclusão dos principais acessos e a estabilização do ritmo operacional, enquanto na fase final, 2029 e 2030, apresentaria

redução gradual, acompanhando o esgotamento das zonas mais ricas do corpo mineralizado. Já no final do período de produção, a partir de 2043, ocorre a recuperação da massa dos *sill pillars*.

A análise também evidenciou que o VRM, apesar de demandar aproximadamente 20% a mais de escavações, apresentaria melhor desempenho econômico ao longo dos anos de 2027 a 2029, devido à maior recuperação de minério e menor diluição. O método de BS, por sua vez, se destacaria nos primeiros anos de lavra, 2027 a 2029, por exigir menor volume de desenvolvimento e permitir rápido retorno operacional, Figura 26. A análise confirmou que o VRM manteria melhor desempenho econômico por unidade de volume, enquanto o BS apresentaria maior produtividade e menor custo unitário. Dessa forma, embora haja preferência técnica pela aplicação do VRM, em razão da massa lavrável e da recuperação obtida, a adoção combinada dos dois métodos mostra-se a solução mais adequada, permitindo adaptar o plano de lavra às condições geométricas e geotécnicas do depósito, conforme discutido com profissionais da área de planejamento e operação de mina.

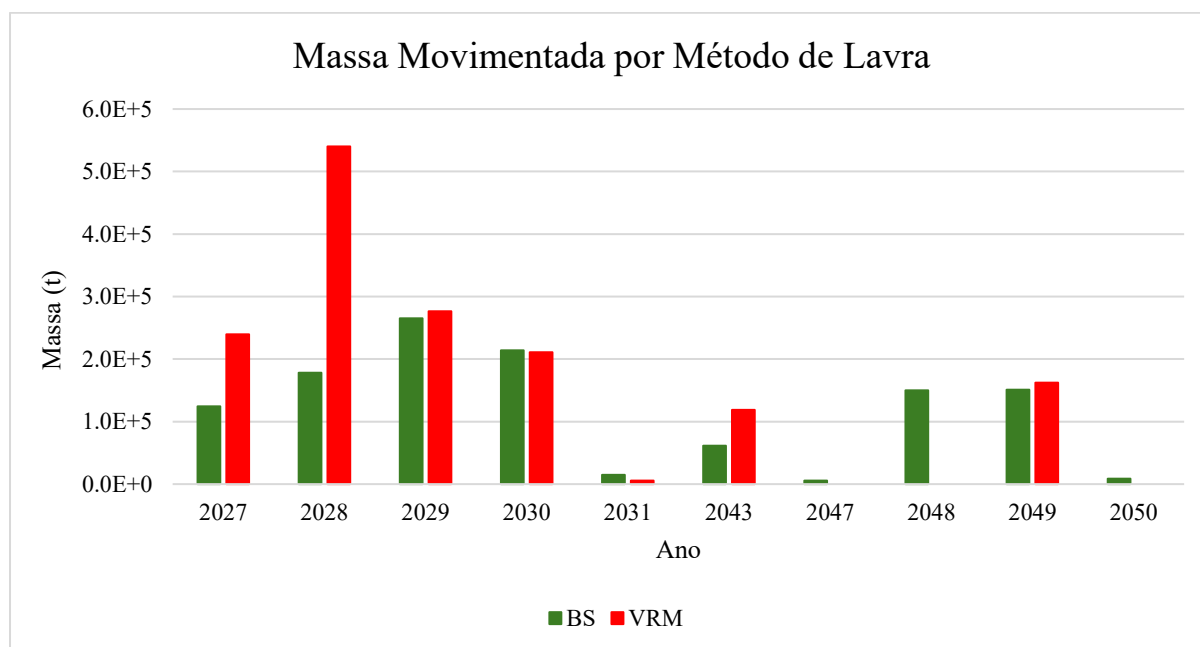


Figura 26: Massa movimentada por método de lavra.

Fonte: (Autor, 2025).

Tabela 5: Dados de massa, teor e metragem total projetada para o nível 4 determinados por meio do Deswik.SCHED.

		2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
		0,00	53.893,77	469.300,10	803.055,07	567.055,60	439.004,11	21.108,01	0,00	0,00	409,97	895,48	0,00	3.091,13
		0,00	5,42	5,94	6,46	5,00	4,64	5,57	0,00	0,00	5,61	7,07	0,00	5,77
		0,00	3,94	4,25	4,53	3,70	3,46	4,15	0,00	0,00	4,41	5,90	0,00	4,75
Level 4	Total	0,00	1,60	1,78	1,90	1,49	1,23	1,86	0,00	0,00	1,65	1,12	0,00	1,28
Total Ore Mined - ROM (t)	3.072.161,75	0,00	0,04	0,04	0,06	0,03	0,05	0,02	0,00	0,00	0,04	0,08	0,00	0,05
Total ZnEq Grade (%)	5,33	0,00	1,14	1,21	1,36	1,06	1,05	0,99	0,00	0,00	0,71	1,05	0,00	1,11
Grade Zn (%)	3,92	0,00	0,14	0,17	0,20	0,11	0,11	0,06	0,00	0,00	0,10	0,17	0,00	0,07
Grade Pb (%)	1,51	0,00	107,57	117,51	127,70	99,45	92,76	109,83	0,00	0,00	108,57	139,28	0,00	115,74
Grade Cu (%)	0,04	0,00	658,86	1.324,66	1.108,96	252,51	181,97	7,53	0,00	0,00	5,09	10,00	0,00	40,00
Grade Ag (%)	1,11	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
Grade Au (%)	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	1.368,47	197.844,08	13.667,45	0,00	1.923,45	14.908,01	162.216,30	313.882,59	8.538,17
NSR (USD/t)	105,78	0,00	0,00	0,00	0,00	5,32	4,14	4,80	0,00	4,40	4,30	3,83	4,51	9,13
Horizontal Development (m)	4.329,92	0,00	0,00	0,00	0,00	4,04	3,25	3,75	0,00	3,79	3,88	3,47	3,52	6,08
		0,00	0,00	0,00	0,00	1,42	1,17	1,21	0,00	0,91	0,77	0,68	1,23	2,86
		0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,04	0,06	0,00	0,03	0,06	0,06	0,03	0,03
		0,00	0,00	0,00	0,00	1,21	0,80	1,10	0,00	0,83	0,64	0,52	0,95	2,34
		0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,08	0,06	0,00	0,05	0,03	0,08	0,08	0,19
		0,00	0,00	0,00	0,00	107,33	82,65	96,89	0,00	87,92	85,38	76,69	90,08	180,17
		0,00	0,00	0,00	0,00	17,65	407,37	0,00	0,00	25,43	120,00	161,43	8,46	0,00

Fonte: (Autor, 2025).

Tabela 6: Metragem total planejada.

Escavação	Total	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2034	2035	2036	2037	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
Meters	14.020,87	1.642,32	3.979,23	4.856,00	2.319,37	655,75	537,31	27,53	5,09	57,48	111,36	40,00	145,69	908,21	0,00	0,00	25,43	135,31	230,96	8,46
Meters - DDH_DRIVE	24,00	0,00	12,00	12,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - HAULAGE	1.096,28	0,00	517,82	448,95	129,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - ORE_ACCESS	4.640,04	0,00	896,29	1.557,81	960,49	410,38	107,28	0,00	0,00	57,48	52,56	40,00	110,00	431,20	0,00	0,00	10,00	6,53	0,00	0,00
Meters - ORE_DRIVE	3.592,01	0,00	396,11	1.316,87	735,89	45,37	290,03	7,53	5,09	0,00	38,80	0,00	15,69	357,01	0,00	0,00	15,43	128,77	230,96	8,46
Meters - PUMP	146,79	86,54	30,12	30,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - PWR_STATION	63,13	0,00	47,85	15,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - RAISE	327,18	0,00	83,86	227,70	15,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - RAMP	1.524,77	622,94	504,35	270,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - SUMP	185,91	103,66	68,69	13,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - VENT_DRIVE	2.052,15	829,18	810,23	394,89	17,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - X CUT	368,61	0,00	318,85	49,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: (Autor, 2025).

Tabela 7: Metragem planejada em zonas mineralizadas.

Escavação	Total	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2034	2035	2037	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049
Meters	4.329,92	0,00	658,86	1.324,66	1.108,96	252,51	181,97	7,53	5,09	10,00	40,00	17,65	407,37	0,00	0,00	25,43	120,00	161,43	8,46
Meters - DDH_DRIVE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - HAULAGE	30,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - ORE_ACCESS	1.741,12	0,00	278,87	519,24	452,19	223,77	46,07	0,00	0,00	10,00	40,00	10,00	150,99	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00
Meters - ORE_DRIVE	2.551,52	0,00	342,72	805,42	656,76	28,74	135,90	7,53	5,09	0,00	0,00	7,65	256,39	0,00	0,00	15,43	120,00	161,43	8,46
Meters - PUMP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - PWR_STATION	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - RAISE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - RAMP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - SUMP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - VENT_DRIVE	7,27	0,00	7,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Meters - X CUT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: (Autor, 2025).

4.4 Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos para o nível 4 indicam coerência entre o planejamento proposto e os parâmetros operacionais adotados em minas subterrâneas que utilizam métodos de lavra com enchimento, como aquelas descritas em estudos clássicos de planejamento e métodos subterrâneos, a exemplo de operações polimetálicas apresentadas por Hustrulid e Bullock (2001) e Curi (2017). A metragem média de desenvolvimento horizontal planejada, de 1.200 m a 1.250 metros por mês, encontra-se dentro da faixa reportada para minas mecanizadas com elevada demanda por infraestrutura, incluindo rampas, travessas, sistemas de ventilação e enchimento.

A análise comparativa entre os métodos de lavra reforça a consistência dos resultados obtidos. Embora o VRM apresente maior demanda de escavações em relação ao BS, o aumento observado, de 20% a 22%, é compatível com a literatura técnica que aborda métodos com enchimento cimentado e grandes alturas de painéis, conforme discutido por Hustrulid e Bullock, (2001), bem como por estudos aplicados ao VRM em minas polimetálicas (como Alves, 2023). Esse incremento é compensado por maior recuperação de minério e menor diluição, refletindo positivamente nos indicadores econômicos do nível analisado.

Outro aspecto relevante refere-se ao aproveitamento econômico durante o desenvolvimento, estimado em aproximadamente 30%, indicando que parcela significativa das escavações ocorre em zonas mineralizadas. Esse comportamento é consistente com práticas observadas em operações subterrâneas polimetálicas, nas quais o desenvolvimento é propositalmente alinhado ao corpo mineralizado para reduzir volumes em estéril, conforme descrito em trabalhos de planejamento estratégico de lavra subterrânea (Curi, 2017; Musingwini, 2016; Otto e Musingwini, 2019).

De forma geral, os índices obtidos, tanto de desenvolvimento quanto de desempenho econômico, mostram-se compatíveis com metas operacionais realistas reportadas na literatura técnica e em estudos de caso de minas subterrâneas polimetálicas, especialmente aquelas que adotam métodos com enchimento e planejamento integrado de longo prazo. A aplicação combinada dos métodos BS e VRM permitiu equilibrar produtividade, recuperação e estabilidade, evidenciando que a adoção de critérios técnicos integrados resulta em um planejamento robusto e aderente às condições reais do depósito.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do planejamento de longo prazo da Mina Subterrânea de Aripuanã permitiu demonstrar a importância da integração entre o modelo geológico, a análise econômica e os critérios geotécnicos no processo de tomada de decisão em projetos de lavra subterrânea. A abordagem adotada possibilitou a elaboração de um plano de lavra tecnicamente consistente, alinhado às condições reais do depósito e às premissas operacionais consideradas.

A utilização do modelo de blocos associado ao conceito de NSR mostrou-se adequada para a classificação econômica das regiões lavráveis, permitindo a seleção dos blocos com maior potencial de aproveitamento econômico. A partir dessa base, foi possível definir os métodos de lavra mais apropriados para cada setor, evidenciando a aplicação complementar do *Sublevel Stoping* e do *Vertical Retreat Mining*, de acordo com as características geométricas e geotécnicas do corpo mineralizado.

Os resultados obtidos indicaram que, embora o método VRM apresente maior demanda de escavações, este proporciona melhor recuperação de minério e menor diluição, enquanto o BS se destaca pela menor necessidade de desenvolvimento e maior rapidez na preparação das frentes de lavra. A adoção combinada desses métodos permitiu equilibrar produtividade, recuperação e estabilidade, contribuindo para a viabilidade técnica e econômica do nível analisado.

A análise técnico-econômica consolidada confirmou a viabilidade do planejamento proposto, evidenciando que parte significativa do desenvolvimento ocorre em zonas mineralizadas, o que resulta em aproveitamento econômico durante a fase de desenvolvimento. Além disso, os indicadores de produção, desenvolvimento e desempenho econômico mostraram-se compatíveis com metas operacionais realistas para minas subterrâneas polimetálicas.

Dessa forma, o estudo realizado demonstra que a aplicação de critérios técnicos integrados, aliada ao uso de ferramentas digitais de planejamento, constitui um suporte eficaz à engenharia de planejamento de minas subterrâneas, contribuindo para a otimização do aproveitamento do depósito e para a tomada de decisão em projetos de longo prazo.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como continuidade da pesquisa desenvolvida, recomenda-se o aprofundamento da análise econômica e operacional por meio da comparação entre os resultados do planejamento de longo prazo e os dados reais de produção à medida que a lavra do Nível 4 avance. Essa abordagem permitiria avaliar a aderência do modelo proposto e aprimorar a calibração dos parâmetros econômicos e produtivos utilizados.

Outra possibilidade de desenvolvimento consiste na aplicação da metodologia adotada a outros níveis da Mina Aripuanã, considerando variações geológicas, geotécnicas e estruturais ao longo do depósito. A ampliação do estudo possibilitaria a consolidação de um modelo integrado de planejamento, contribuindo para a padronização dos critérios de design e tomada de decisão em horizontes distintos de lavra.

Sugere-se também a realização de análises de sensibilidade mais detalhadas, contemplando diferentes cenários de preços de metais, custos operacionais e parâmetros de *pastefill*. A incorporação de técnicas de otimização e modelos probabilísticos no sequenciamento de lavra pode aumentar a robustez do planejamento e reduzir incertezas associadas às projeções de longo prazo.

REFERÊNCIAS

- AIRES, A. Emulsão de baixa densidade da Enaex em furos de contorno para desmonte de desenvolvimento aumenta segurança e reduz custos de operações no Mato Grosso. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/in/alailson-aires/recent-activity/all/>>. Acesso em: 28/10/2025.
- ALVES, C. M. **Caracterização física do rejeito de mina polimetálica visando sua aplicação como pastefill em operações de vertical retreat mining**, 2023. Porto Alegre-RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- AMARAL, J. P. **Análise de estabilidade para redução do diâmetro de tirantes em mina subterrânea**. 2024.
- ATLAS COPCO. **Underground Blasting Techniques**. Stockholm ed. 2010.
- BARROS, J. R. C. **Padronização de dados e gestão da qualidade no processo de carregamento de furos com explosivos no desmonte de rochas: estudo de caso na Mina Aripuanã**, 8. set. 2025. Dissertação, Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Rock Mass Classifications**. New York - EUA, 1976.
- BLOM, M.; PEARCE, A. R.; COTE, P. Long-Term Open-Pit Mine Planning with Large Neighbourhood Search, p. 1–6, 2025. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2403.18213>>.
- CAMPEAU, L.-P.; GAMACHE, M. Short-term planning optimization model for underground mines. **Computers & Operations Research**, v. 115, p. 104642, 2020.
- CURI, A. **Lavra de Minas**. São Paulo - BR, 2017.
- DESWIK. **Treinamento Underground**. 2023.
- DESWIK. Deswik Spatial. Disponível em: <<https://www.deswik.com/pt-br/products/spatial>>. Acesso em: 22/10/2025.
- GALLEY, A. G.; HANNINGTON, M. D.; JONASSON, I. R. **VHMS deposits in submarine volcanic environments**. **Ore Geology Reviews**. 2007.
- GOLDIE, R. Net Smelter Returns (NSRs) and alternative measures of the value of polymetallic mineralization. **Mineral Economics**, v. 37, n. 1, p. 55–64, 2024.
- GUO, W.; LIU, G.; LI, J.; CHAI, S.; GUO, S. Research on the method of determining the block size for an open-pit mine integrating mining parameters and shovel-truck's operation efficiency. **Scientific reports**, v. 14, n. 1, p. 10119, 2024. Nature Research. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/38698057>>. .
- HALL, B. **Cut-off Grades and optimising the strategic mine plan**. Ausimm ed. 2014.
- HARTMAN, H. L. **Introductory Mining Engineering**. 2º ed. 1987.
- HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering**. 2002.
- HUSTRULID, W.; BULLOCK, R. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and Case Studies. **SME**, p. 1–17, 2001.
- LEITE, D. R.; RIBEIRO, L. C.; XAVIER, R. P.; MONTEIRO, L. V. S.; LADEIRA, E. A. **Caracterização do depósito polimetálico (Zn, Pb, Ag, Cu, Au) de Aripuanã, Mato Grosso**. 4º ed. Aripuanã, 2005.

- MCFADYEN, B.; GRENON, M.; WOODWARD, K.; POTVIN, Y. Optimising stope design through economic and geotechnic assessments of predictions made at a meter scale resolution using the sites' reconciled data. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 178, p. 105778, 2024.
- MCPHERSON, M. J. Background to subsurface ventilation and environmental engineering. **Subsurface Ventilation and Environmental Engineering**. p.1–11, 1993. Dordrecht: Springer Netherlands.
- MUSINGWINI, C. Presidential Address: Optimization in underground mine planning-developments and opportunities. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 116, n. 9, p. 809–820, 2016. South African Institute of Mining and Metallurgy. Disponível em: <<http://ref.scielo.org/8y8gxv>>.
- NEXA RESOURCES. **Projeto Aripuanã – Relatório Técnico**. 2021.
- OLIVEIRA, P. L. **Dimensionamento dos parâmetros de escavação para implementação do método VRM na Mina Aripuanã**. 2023. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2023.
- OTTO, T. J.; MUSINGWINI, C. Spatial mine-to-plan compliance approach to improve alignment of short-and long-term mine planning at open pit mines. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 119, p. 225–244, 2019.
- PÉREZ, J.; MORALES, N.; WIDZYK-CAPEHART, E.; ROJAS, V.; VALLEJOS, J. Short and medium term mine planning in selective underground mining considering equipment performance. **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING & EQUIPMENT SELECTION**, p. 1–6, 2017.
- PONIEWIERSKI, J. **Block Model Knowledge for Mining Engineers-An Introduction Block Model Knowledge for Mining Engineers** |. 2019.
- PONIEWIERSKI, J. Conhecimento de modelo de blocos para engenheiros de mineração - Uma introdução. Disponível em: <<https://www.deswik.com/pt-br/whitepapers/block-model-knowledge-for-mining-engineers-an-introduction>>. Acesso em: 23/10/2025.
- RESENDE, P. Avaliações geotécnicas de estabilidade. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/in/philipperesende/recent-activity/all/>>. Acesso em: 26/1/2026.
- RESENDE, P.; AMARAL, J. P. B.; RODRIGUES, C. O.; OLIVEIRA, P. L. DE; VIANA, V. F. Avaliação geotécnica de realce do tipo transverse sublevel conectando três interníveis produtivos. **ANAIS DO 12^a CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO E MINA SUBTERRÂNEA**, 2025. Ouro Preto.
- RUNGE, I. C. **Mining Economics and Strategy**. 1998.
- SANTOS, V.; DA SILVA, P.; BRITO, M. Estimating RMR Values for Underground Excavations in a Rock Mass. **Minerals**, v. 8, n. 3, p. 78, 2018.
- SILVA, J. M. DA. **MIN114 - Métodos de Lavra subterrânea**. Ouro Preto, 2024.
- SOARES, A. I. T. **Sequenciamento de operações de transporte em rampas de acesso a minas subterrâneas**, fev. 2014. Dissertação, Coimbra - PT: Universidade de Coimbra.
- SOTOUDEH, F.; NEHRING, M.; KIZIL, M.; KNIGHTS, P.; MOUSAVI, A. Production scheduling optimisation for sublevel stoping mines using mathematical programming: A review of literature and future directions. **Resources Policy**, v. 68, p. 101809, 2020.

- TÔRRES, A. L. P. **Análise detalhada do Índice de Aderência no Planejamento de Mina a Curto Prazo**, 20. set. 2024. Dissertação, Ouro Preto: UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO.
- WANG, S.; DONG, F.; ZHANG, Z.; YANG, B.; HOU, Q. Multi-index dominant grouping of rock mass discontinuities based on the combined weighting method: A case study for the Huayang tunnel. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 139, p. 105211, 2023.
- WU, Z.; WU, L.; LIN, T.; NIU, W.-J. An engineering rock mass quality classification system for deep-buried hard rock tunnels. **Frontiers in Earth Science**, v. 12, 2024.