



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN



JUAN PABLO NEIMERCK DE CASTRO

**OPERACIONALIZAÇÃO A PARTIR DE UMA CAVA MATEMÁTICA ÓTIMA E
ANÁLISE DE ADERÊNCIA**

Ouro Preto – MG
2025

JUAN PABLO NEIMERCK DE CASTRO

juan.neimerck@aluno.ufop.edu.br

**OPERACIONALIZAÇÃO A PARTIR DE UMA CAVA MATEMÁTICA ÓTIMA E
ANÁLISE DE ADERÊNCIA**

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

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C355o Castro, Juan Pablo Neimerck de.
Operacionalização a partir de uma cava matemática ótima e análise de aderência. [manuscrito] / Juan Pablo Neimerck de Castro. - 2025.
39 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Mineração a céu aberto - Cava ótima. 2. Minas e recursos minerais - Planejamento. 3. Lavra de minas. I. Silva, José Margarida da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.014

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Juan Pablo Neimerck de Castro

Operacionalização a partir de uma cava matemática ótima e análise de aderência

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 01 de setembro de 2025

Membros da banca

Doutor- José Margarida da Silva - Orientador- Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor- Hernani Mota de Lima - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Henrique Nogueira Soares

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 18/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Jose Margarida da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/09/2025, às 18:58, 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 **0981020** e o código CRC **333660F9**.

Dedico este trabalho aos meus pais, Fabiana Neimerck
e Pablo Kennon, e ao meu irmão Alessandro Augusto,
pelo incentivo e apoio ao longo do caminho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Margarida da Silva, pelo grande apoio.

Aos amigos do curso de engenharia de minas e toda UFOP que foram importantes nesta etapa da minha vivência universitária.

À Grandiosa República Espigão e a todos moradores pelos anos de amizades e ensinamentos.

Aos professores do DEMIN, pelo ensino, troca de experiências e oportunidades.

À Escola de Minas, pelo excelente e tradicional curso de graduação em Engenharia de Minas.

“Não há nada tão estúpido quanto a inteligência orgulhosa de si mesma.”

Mikhail Bakunin

RESUMO

A mineração é uma atividade essencial para o desenvolvimento econômico e tecnológico, e a viabilidade depende de um planejamento estratégico de lavra eficiente. Nesse contexto, a etapa de otimização de cava fornece um limite matematicamente ótimo, porém distante das condições práticas de operação. Este trabalho teve como objetivo realizar a operacionalização de uma cava matemática ótima, avaliando sua aderência em relação ao modelo teórico. Para isso, utilizou-se o *software* Whittle na definição da cava matemática, o Datamine Studio OP para a operacionalização, o Surpac na execução da cubagem e o Microsoft Excel para análise dos resultados. A comparação entre a cava operacional e a cava matemática foi feita por meio do cálculo da aderência volumétrica. Os resultados obtidos indicaram uma redução de 4% na massa de minério lavrado e um acréscimo de 35% no volume de estéril movimentado, valores dentro dos limites aceitáveis para a prática minerária. Dessa forma, a cava operacionalizada demonstrou ser exequível, confirmando a aplicabilidade da metodologia adotada e atendendo ao objetivo proposto.

Palavras-chave: mineração; cava ótima; operacionalização, aderência; planejamento de lavra

ABSTRACT

Mining is an essential activity for economic and technological development, whose feasibility depends on efficient strategic mine planning. In this context, pit optimization provides a mathematically optimal limit, but one that is distant from practical operating conditions. This study aimed to operationalize an optimal mathematical pit and evaluate its adherence in relation to the theoretical model. For this purpose, Whittle software was applied to define the optimal pit, Datamine Studio OP was used for pit operationalization, Surpac for volumetric calculations, and Microsoft Excel for data analysis. The comparison between the operational pit and the mathematical pit was carried out through volumetric adherence analysis. The results indicated a 4% reduction in ore mass and a 35% increase in waste volume, values considered acceptable in mining practice. Therefore, the operational pit proved to be feasible, confirming the applicability of the adopted methodology and meeting the proposed objective.

Keywords: mining; optimal pit; operationalization; adherence; mine planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Representatividade da sessão horizontal de uma cava a céu aberto.	5
Figura 2-2: Cava dos diferentes cenários otimizados.	8
Figura 2-3: Gráfico da relação entre Tonelagem Total e Valor Total dos diferentes cenários otimizados.	8
Figura 2-4: Geometria de Cava.	10
Figura 2-5: Gradiente e suas relações.	10
Figura 3-1 Recursos inferidos e limites da cava ótima.	13
Figura 3-2: Cava Matemática elaborada no Whittle.	15
Figura 3-3: Linhas Cava Matemática.	16
Figura 3-4: Área de Proteção Permanente	17
Figura 4-1: Imagem da Topografia da Cava Operacionalizada em perspectiva.	19
Figura 4-2: Imagem da Topografia da Cava Operacionalizada em Planta.	19
Figura 4-3: Cava Operacionalizada, pilhas de rejeito (marrom) e estéril (vermelha), área da planta (linha em rosa), e linha de DMT externas (linha em amarelo).	20
Figura 4-4: Seção Cava Operacional e Matemática.	21
Figura 4-5: Seção na altura das cristas dos bancos da cava.	21
Figura 4-6: Sólido da Cava Operacional.	22
Figura 4-7: Imagem do <i>Software</i> SURPAC durante a cubagem.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 - Parâmetros de processamento e produção	1
Tabela 3-1: Parâmetros para Operacionalização.	15
Tabela 3-2 - Parâmetros para operacionalização de Pilhas.	18
Tabela 4-1- Resultados de cubagem.....	23
Tabela 4-2: Resultados de aderência.	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DEMIN	-	Departamento de Engenharia de Minas
REM	-	Relação Estéril/Minério
ROM	-	<i>Run of Mine</i>
PAE	-	Plano de Aproveitamento Econômico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Formulação do Problema.....	3
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Objetivo Geral.....	4
1.3.2	Objetivos Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Lavra a Céu Aberto.....	5
2.2	Planejamento de Mina.....	6
2.2.1	Estudo conceitual.....	6
2.2.2	Estudo preliminar.....	6
2.2.3	Estudo de viabilidade.....	7
2.3	Otimização de Cava.....	7
2.4	Operacionalização de Cava.....	9
2.4.1	Geometria da Cava.....	9
2.4.2	Gradiente.....	10
2.5	Aderência.....	11
3	METODOLOGIA.....	12
3.1	Banco de Dados.....	12
3.2	Mina em estudo.....	12
3.3	<i>Softwares</i> utilizados.....	14
3.4	Operacionalização da Cava.....	14
3.5	Operacionalização da pilha de rejeito e estéril.....	17
3.6	Cubagem.....	18
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
4.1	Análise da Operacionalização.....	19
4.2	Cubagem.....	22
4.3	Análise da Aderência.....	23
5	CONCLUSÃO.....	24
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

1 INTRODUÇÃO

A mineração tem como finalidade utilizar de forma racional uma jazida, passando por um ciclo composto por várias fases: prospecção, exploração, desenvolvimento, lavra e beneficiamento do minério, e fechamento de mina. Dentro desse processo, a etapa da lavra reúne diferentes operações unitárias, como perfuração, desmonte, carregamento e transporte. O propósito dessas atividades é garantir que o aproveitamento do recurso mineral ocorra de maneira segura, econômica e ambientalmente sustentável (FONTES, 2016).

A planta de beneficiamento foi projetada para processar 1,38 milhão de toneladas de ROM por ano (Mtpa), funcionando 365 dias por ano, 24 horas por dia, divididas em 2 turnos diários na área de britagem e 3 turnos diários na planta de concentração (moagem, flotação e filtragem). O resumo dos parâmetros do Projeto e da produção são observados na Tabela 1-1.

Tabela 1-1 - Parâmetros de processamento e produção

Item	Unidade	Valor
Alimentação Anual - ROM	Mtpa	1,38
Teor - ROM	%Cg	2,8
Recuperação Metalúrgica	%	90
Teor do Concentrado	\$Cg	95
Produção anual de Concentrado	tpa	35.880
Granulometria Produto	"+30#, -30# (600 µm)"	

Fonte: (Autor, 2025)

Dentre esses fatores importantes da mineração, existe uma etapa que tenta prever de forma teórica fatores que influenciam na viabilidade dos empreendimentos, etapa essa é o planejamento mina. Este é subdividido entre curto, médio e longo prazo. Dentro do planejamento a longo prazo existe a necessidade de uma análise da viabilidade do projeto de mineração. Dentro dessa análise se prevê a operacionalização da cava matemática teórica gerada pelo processo de otimização de cava ótima por *software* (GRIEBELER, 2010).

A operacionalização se vê necessária pois no processo de otimização de cava não se levam em consideração parâmetros operacionais como acessos, praças mínimas de trabalho, fatores geotécnicos específicos, entre outros (SIMONI, 2018). Durante o processo de otimização de cava no *software* Whittle, os *inputs* e ajustes são importantes para a definição de um modelo econômico e tecnicamente viável. Entre os principais parâmetros de entrada estão os preços de venda das *commodities*, custos de lavra e beneficiamento, recuperação metalúrgica, fatores de diluição e teor de corte. Esses dados, junto ao modelo de blocos,

permitem ao *software* aplicar algoritmos de otimização, como o de Lerchs-Grossmann, para determinar os limites econômicos da cava. Além disso, ajustes finos, como restrições geotécnicas, ângulos de talude, rampas de acesso e taxas de produção, podem ser incorporados para aproximar o resultado das condições reais de operação, tornando a análise mais robusta e aderente ao planejamento de lavra.

Para a validação do processo de operacionalização foi feita a cubagem do sólido gerado, assim possibilitando a comparação e avaliação do resultado por meio da aderência alcançada da cava operacional em relação a cava matemática otimizada (MOREIRA, 2024).

A grafita é um mineral de grande relevância econômica devido às suas propriedades físico-químicas, como alta condutividade térmica e elétrica, além da resistência a elevadas temperaturas, o que a torna essencial em diversas aplicações industriais, incluindo a produção de baterias de íons de lítio, refratários e lubrificantes sólidos. As principais minas de grafita no mundo encontram-se distribuídas em países como China, Moçambique, Brasil, Índia e Canadá, sendo a China a maior produtora global, responsável por mais de 60% do fornecimento mundial. Essa concentração da produção em determinadas regiões evidencia a importância estratégica da grafita para a cadeia produtiva global, bem como a necessidade de novos investimentos em projetos de mineração para diversificação da oferta (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2023).

Com o crescimento da produção e do uso de veículos elétricos, projeta-se um aumento expressivo na demanda por ânodos de grafita. A reciclagem surge como uma alternativa para atenuar a necessidade de novas matérias-primas; contudo, ainda enfrenta obstáculos relacionados a aspectos tecnológicos, sociais e ambientais (GIURCO, 2019).

O fornecimento de grafita em flocos enfrenta desafios significativos, influenciados por incertezas tanto internas quanto externas aos projetos de mineração, que são a principal fonte desse material. Os modelos atualmente utilizados para estimar a oferta de grafita (Weber, 2023; Barre et al., 2024; Park et al., 2025) tendem a desconsiderar a natureza estocástica desse processo, especialmente quando analisado sob a ótica do ciclo de vida de um empreendimento mineral. Em geral, tais modelos baseiam-se em premissas determinísticas, desconsiderando as variações aleatórias e as interdependências próprias do desenvolvimento e da extração mineral. O trabalho de Andrade et Al. (2025) busca superar essas limitações ao propor uma metodologia estocástica que incorpora de forma sistemática tanto o ciclo de vida dos projetos quanto as incertezas inerentes a eles.

1.1 Formulação do Problema

Nas operações de lavra a céu aberto, o planejamento da cava a longo prazo é fator determinante para a sustentabilidade técnica e econômica do empreendimento mineral. Entretanto, muitas empresas negligenciam essa etapa estratégica e concentram seus esforços apenas em planejamentos de curto prazo, voltados para atender metas imediatistas de produção.

As incertezas e os riscos que sempre aparecem em projetos de mineração não podem ser deixados de lado, já que eles têm força para mudar bastante o resultado da avaliação econômica. Por isso, quando se analisa esse tipo de empreendimento, é essencial pensar nesses fatores, pois podem pesar muito no sucesso ou fracasso do projeto (HAQUE et al., 2016).

Do ponto de vista operacional, observam-se a perda de eficiência na movimentação de estéril, aumento de distâncias de transporte, dificuldades na gestão de pilhas de estéril e minério, além de impactos diretos na segurança operacional.

Ademais, a inexistência de um modelo de cava otimizada, a longo prazo, compromete a recuperação final das reservas, reduz a vida útil da mina e, em muitos casos, conduz à paralisação precoce do empreendimento. Essa realidade configura um problema recorrente no setor mineral, demonstrando que o não alinhamento entre planejamento estratégico e execução operacional compromete tanto a competitividade quanto a perenidade das empresas.

Como o planejamento de longo prazo da cava impacta nos resultados financeiros e operacionais das empresas mineradoras? Esse trabalho procura auxiliar nesse ponto e trazer alternativas para tratarmos esses pontos.

1.2 Justificativa

A mineração é uma atividade de alta complexidade técnica e de elevado risco financeiro, na qual decisões equivocadas de planejamento podem comprometer a viabilidade econômica do empreendimento. O planejamento de longo prazo da cava permite estabelecer diretrizes claras para o aproveitamento racional das reservas, garantindo previsibilidade de custos, eficiência operacional e maior segurança nas atividades de lavra.

Apesar disso, muitas empresas ainda optam por modelos de gestão focados apenas em resultados imediatos, sem considerar a totalidade do ciclo de vida da mina. Essa prática gera

desperdício de recursos, redução da vida útil da cava, perda de reservas economicamente viáveis e aumento dos custos de operação. Além do impacto direto no caixa da empresa, tais falhas de planejamento comprometem sua competitividade no mercado e podem resultar em encerramentos prematuros de atividades.

Portanto, justifica-se a presente pesquisa pela importância de compreender e demonstrar, de forma sistemática, uma cava matemática quando operacionalizada a fim de se tornar exequível no cenário prático.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi realizar o planejamento a longo prazo pela operacionalização de uma cava matemática calculada por um *software* de otimização.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- operacionalizar cava final a partir de uma cava matemática;
- analisar a aderência da cava operacional em relação à cava matemática.

1.4 Estrutura do Trabalho

No primeiro capítulo tem-se uma breve introdução acerca da importância da mineração em um contexto mundial e seus desafios para um desenvolvimento sustentável, contendo a formulação do problema, a justificativa, os objetivos – geral e específicos, bem como a estrutura do trabalho. O segundo capítulo refere-se a uma revisão bibliográfica acerca de lavra de mina a céu aberto, planejamento de mina, otimização de cava, operacionalização de cava e aderência, utilizando-se de artigos científicos e base de dados disponíveis na literatura atual. No terceiro capítulo observa-se a metodologia empregada neste estudo nomeadamente na operacionalização. No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos. Por fim no quinto capítulo são feitas as considerações finais e é apresentada a discussão e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lavra a Céu Aberto

Segundo Curi (2014), a lavra a céu aberto apresenta viabilidade econômica e tecnológica especialmente quando os depósitos minerais estão localizados em camadas rasas ou a profundidades intermediárias. Esse tipo de mina pode ser implantado em forma de cava ou em meia encosta, resultando em aberturas que, geralmente, se posicionam abaixo do nível topográfico natural do terreno.

A produção em lavra a céu aberto tem início após a determinação e avaliação das características do minério e das rochas encaixantes de uma área, considerando parâmetros como teores, espessuras, volumes, massas específicas e profundidade. Com base nessas informações, o corpo mineralizado pode ser classificado como recurso, de acordo com o nível de confiabilidade e o grau de detalhamento alcançado nas técnicas de prospecção mineral.

Quando se colocam as informações econômicas no modelo de recurso mineral pensado, chega-se na reserva mineral lavrável, que serve para definir o contorno da cava ótima no planejamento da produção. A Figura 2-1 mostra o desenho do contorno de uma cava a céu aberto numa seção de corte horizontal do terreno. Nela também dá para se observar como estão dispostos os materiais que ficam por cima do minério. Para aproveitar o minério, é preciso tirar antes a cobertura vegetal, solo orgânico, o solo estéril e depois a rocha estéril, nessa ordem (CURI, 2014).

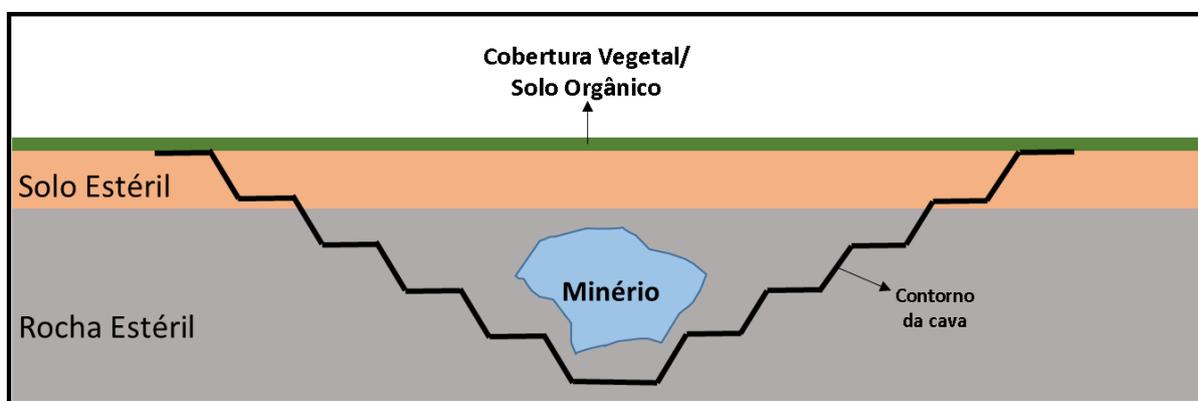


Figura 2-1: Representatividade da sessão horizontal de uma cava a céu aberto.

Fonte: (Autor, 2025).

2.2 Planejamento de Mina

Segundo Pinto e Dutra (2008), o planejamento de mina resulta de uma série de estudos voltados a encontrar a melhor forma de aproveitar economicamente um depósito mineral, aproveitando-o ao máximo. O objetivo é otimizar a recuperação do minério, buscando o maior lucro possível. Hoje, essa otimização é feita com o auxílio de modelos matemáticos e computacionais, que permitem simular diferentes cenários.

Na prática, o planejamento visa expor a maior quantidade possível de minério para a lavra, removendo o mínimo de estéril, já que a movimentação desse material representa custos elevados. No entanto, só é viável liberar o minério se a remoção do estéril necessária estiver prevista em um cenário economicamente favorável (Pinto e Dutra, 2008).

O planejamento de mina é dividido em três etapas: Estudo Conceitual, Estudos Preliminares e Estudo de Viabilidade, que serão detalhados a seguir.

2.2.1 Estudo conceitual

Segundo Curi (2014), o estudo conceitual é elaborado a partir das primeiras ideias e análises sobre o possível aproveitamento de um bem mineral, utilizando principalmente dados históricos de projetos e áreas semelhantes. Nessa etapa, avalia-se a aderência estratégica do empreendimento, o que permite identificar possíveis erros, como geológicos, operacionais, de mercado, políticos, ambientais e financeiros. Por ser a fase inicial do planejamento, admite-se uma margem de erro na estimativa de custos de até 30%. É também nesse momento que se apresentam as expectativas de investimento para o futuro projeto mineiro.

2.2.2 Estudo preliminar

O estudo preliminar representa um nível mais avançado que o estudo conceitual, oferecendo um grau intermediário de detalhamento e resultados ainda não definitivos. Seu principal objetivo é avaliar se vale a pena avançar para uma análise mais aprofundada por meio dos estudos de viabilidade técnica e econômica. Geralmente, esse estudo envolve duas ou três pessoas da empresa, com suporte de especialistas em áreas específicas, e apresenta um custo médio, bem abaixo do alto custo associado ao estudo de viabilidade. Nessa fase, são conduzidos estudos iniciais de viabilidade econômica, comparação de alternativas e avaliação de outros investimentos mineiros, sempre buscando opções de menor risco e maior retorno (Curi, 2014).

À medida que o projeto avança, é necessário realizar diversas análises utilizando um volume cada vez maior de informações, com o objetivo de aprimorar a precisão dos resultados, até que se tomem as decisões finais para o desenvolvimento da lavra (Pinto e Dutra, 2008).

2.2.3 Estudo de viabilidade

De acordo com Curi (2014), o estudo de viabilidade avalia aspectos econômicos, legais, tecnológicos, geológicos, ambientais e sociopolíticos, com o objetivo de refinar os fatores essenciais para o sucesso do empreendimento. Ao final dessa etapa, é feito um parecer sobre a viabilidade do projeto da mina. Com os fatores do projeto definidos, torna-se necessário considerar o maior número possível de variáveis, a fim de estimar o valor potencial e os custos associados ao bem mineral.

2.3 Otimização de Cava

Para qualquer modelo de depósito de minério, sempre existem várias cavas finais possíveis, e cada cava pode ser mais ou menos rentável. Segundo Whittle (2006), para começar os estudos de otimização, primeiro é preciso levantar quais são as variáveis envolvidas, começando pelo estudo do limite da cava final, que considera a função objetivo para maximizar o lucro da cava e as restrições para respeitar, como os ângulos dos taludes da cava e inclusive as de limitação ambiental.

Como o empreendimento busca gerar lucro sobre o investimento, foram feitos algoritmos que criam situações ótimas, ou seja, sequências matemáticas baseadas na situação que dê maior lucratividade obedecendo-se critérios a critérios e registrando-se no Plano de Aproveitamento Econômico (PAE).

Whittle (2006) aponta algumas questões para definir a cava ótima. Primeiro, fatores que influenciam a cava de um corpo de minério, como preço e custo: se o preço do mineral sobe, a cava tende a ser maior; se os custos sobem, acontece o contrário. O ângulo do talude também influencia bastante a cava final, geralmente, um ângulo mais íngreme faz a cava ficar mais profunda. Depois de definir esses dois parâmetros, já é possível determinar a cava ótima com valor total máximo.

Para mostrar como são feitas as análises para escolher a cava final, observa-se na Figura 2-2 um exemplo de cava final com mineralização vertical de teor constante, considerando que todos os limites da cava e os parâmetros geotécnicos já estão definidos.

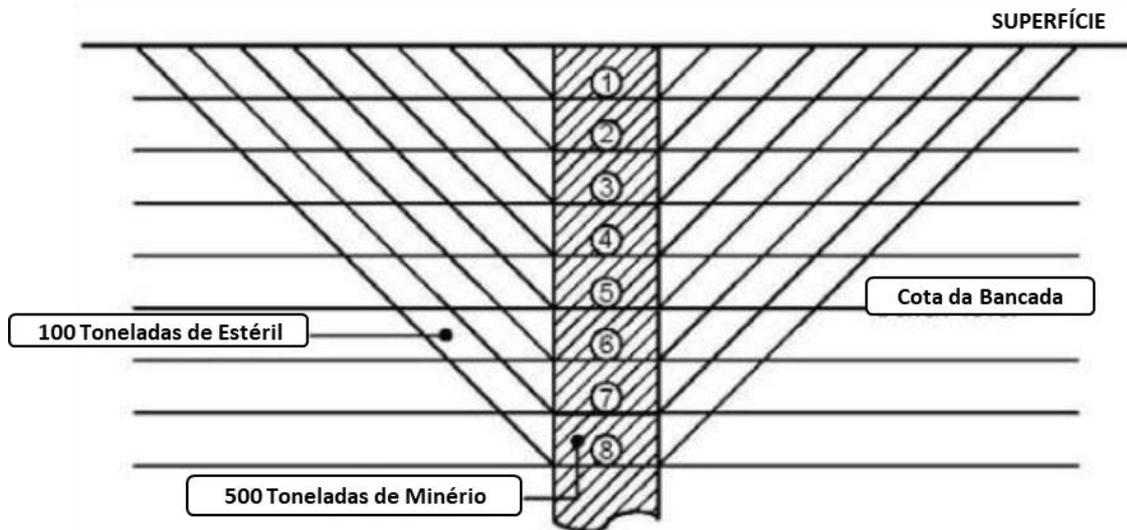


Figura 2-2: Cava dos diferentes cenários otimizados.

Fonte: Adaptado de (Whittle, 2006).

Observa-se na Figura 2-3 o gráfico da relação entre tonelagem total vs valor total dos diferentes cenários otimizados, onde foram geradas oito cavas finais diferentes, cada uma com uma tonelagem total distinta. Dá para notar que a quantidade de minério aumenta de forma quase linear do primeiro cenário (cava 1) até a última cava (cava 8), mas a quantidade de estéril cresce como o quadrado do número da cava. Também é possível ver na Figura 2-3 que na cava 5 as tonelagens totais se igualam, ou seja, a REM (relação entre massas de estéril e minério) é igual a um.

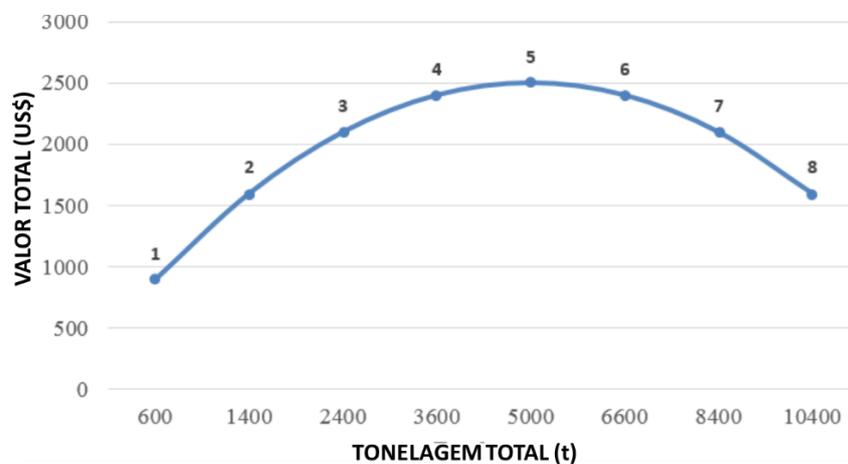


Figura 2-3: Gráfico da relação entre Tonelagem Total e Valor Total dos diferentes cenários otimizados.

Fonte: Adaptado de (Whittle, 2006).

Quando se olha o gráfico da Figura 3, é comum que especialistas fiquem confusos na hora de escolher a cava final, porque as cavas 4 e 6, mostradas na Figura 2-3, têm rentabilidade bem próxima à da cava ótima, que é a 5. Segundo Whittle (2006), mesmo sendo pequena, essa diferença precisa ser considerada, já que a próxima fase do planejamento é a operacionalização das cavas. Durante essa etapa, podem surgir desvios na aderência entre a cava final operacionalizada e a cava ótima, por causa de fatores como o tamanho das rampas e das bermas. Por isso, sempre se deve optar pela cava com o resultado ótimo.

2.4 Operacionalização de Cava

O limite que se define para cava é o que vai guiar como vai ser feito o desenho operacional dela e também o sequenciamento da lavra. Esse sequenciamento, por sua vez, é que define a alimentação da planta de beneficiamento, podendo dificultar ou facilitar o processo. No fim das contas, é isso que impacta nos custos, já que o sucesso econômico do projeto depende da programação de produção da usina, como indica Souza (2016).

2.4.1 Geometria da Cava

Wyllie e Mah (2004) descrevem a geometria de uma cava em mina a céu aberto, ilustrada na Figura 2-4, como composta por três elementos principais. O primeiro é o ângulo global do talude, que vai da crista até o pé da cava, englobando todas as rampas e bancadas, e que pode variar ao longo do perímetro para se ajustar à geologia local e à disposição das rampas de acesso. O segundo é o ângulo entre rampas, que corresponde à inclinação existente entre cada rampa e é influenciado tanto pela quantidade quanto pela largura dessas rampas. Por fim, há o ângulo de face da bancada, determinado pelo espaçamento vertical entre os bancos.

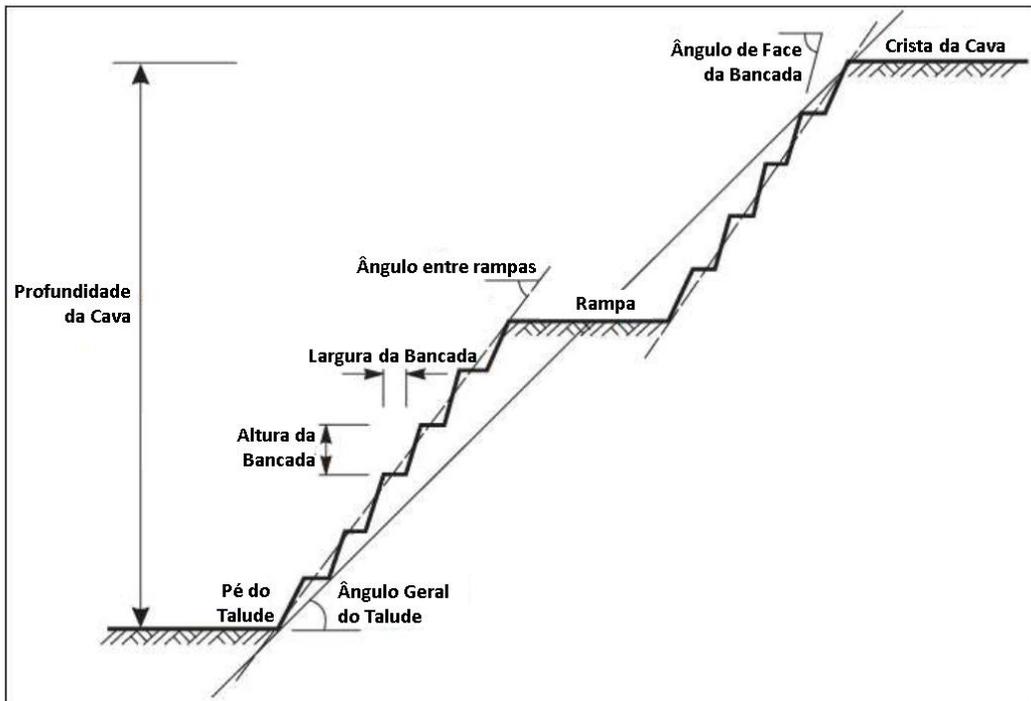


Figura 2-4: Geometria de Cava.

Fonte: Adaptado de (Wyllie e Mah, 2004).

2.4.2 Gradiente

Segundo Menezes (2010), a escolha do gradiente de uma rampa influencia diretamente o desempenho da frota de caminhões em uma mina, especialmente quando há várias rampas dando acesso a diferentes frentes de trabalho. Esse gradiente corresponde à relação percentual entre o deslocamento vertical e o horizontal, como ilustrado na Figura 2-5.

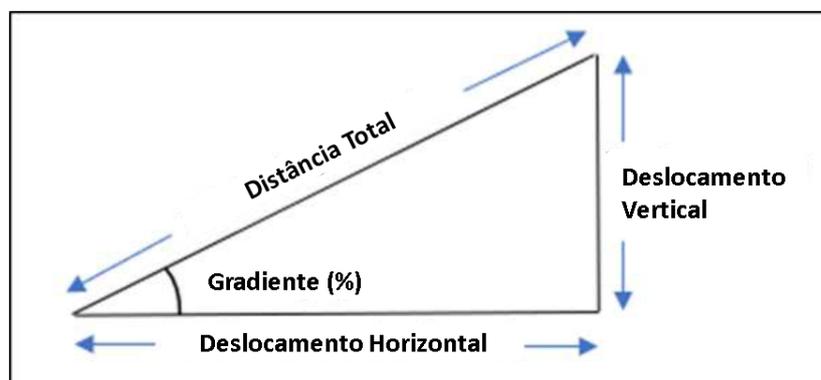


Figura 2-5: Gradiente e suas relações.

Fonte: (Autor, 2025).

Neste trabalho optou-se por um gradiente de 10% a partir de informações geológicas e operacionais preliminares definidas pelo banco de dados fornecido pela empresa que são apresentadas à frente no trabalho.

2.5 Aderência

O objetivo da operacionalização é fazer com que a diferença de cubagem entre a cava matemática ótima e a operacional seja mínima. Essa diferença entre as duas cavas recebe o nome de Aderência.

Para o cálculo de aderência são usadas as massas geradas pela cubagem da cava operacionalizada e da cava ótima, sendo feita a relação entre elas respectivamente. Observa-se a Equação 1 a seguir:

$$Aderência(\%) = \frac{Massa\ Cava\ Operacionalizada}{Massa\ Cava\ Matemática} \times 100 \quad (1)$$

3 METODOLOGIA

A seguir serão indicados os passos seguidos para a execução do trabalho.

3.1 Banco de Dados

O banco de dados utilizado para a operacionalização é oriundo de uma grande empresa de mineração. Por razões de sigilo corporativo, não serão divulgados a sua localização nem os valores econômicos reais empregados na elaboração do trabalho.

3.2 Mina em estudo

A mina está situada em um núcleo orógeno, onde o metamorfismo atinge seu grau mais elevado, alcançando as fácies anfibolito a granulito, cuja idade desse metamorfismo varia entre 585 e 560 milhões de anos. Nessa zona, há diversos afloramentos de gnaisses e paragneisses.

Tais complexos de paragneisses, conhecido como kinzigítico, são compostos essencialmente por paragneisses com teores variáveis de silicatos peraluminosos, como biotita, almandina, cordierita, sillimanita e kinsigito (*stricto sensu*, grafita). O protólito do kinsigito é um pelito rico em fração argilosa aluminosa, com pouco material carbonoso, como é típico dos paragneisses. O Kinsigito caracteriza o metamorfismo de pelitos nas fácies de alto grau, entre anfibolito e granulito.

A região da jazida é caracterizada por gnaisses kinzigíticos migmatizados com estruturas dobradas abundantes, contendo porções de paleossoma gnáissico cinza a cinza-escuro, quase preto, com biotitas verdadeiras, intercaladas com leucossoma granítico praticamente homogêneo, em formas variadas. Também estão presentes estruturas nebulíticas. Observam-se remanescentes de rochas calcissilicatadas, lentes de rochas quartzosas, níveis de gnaiss biotítico e corpos de granitos e microgranitos com dimensões centimétricas a métricas.

A área possui mineralização disseminada que é identificada visualmente com mais de 65% de flocos de tamanho superior a 80 mesh (foco grande), incluindo aproximadamente 35% acima de 50 mesh (foco jumbo); é importante notar que ambos os valores se referem aos concentrados finais, podendo-se, portanto, assumir que o ROM (run of mine) possui uma quantidade ainda maior de flocos acima de 80#. Além disso, a mineralização está presente em camadas estratificadas maciças associadas ao principal controle estrutural.

Observa-se a seguir figura 3-1 mostrando o modelo de blocos filtrado com os recursos inferidos e a cava ótima.

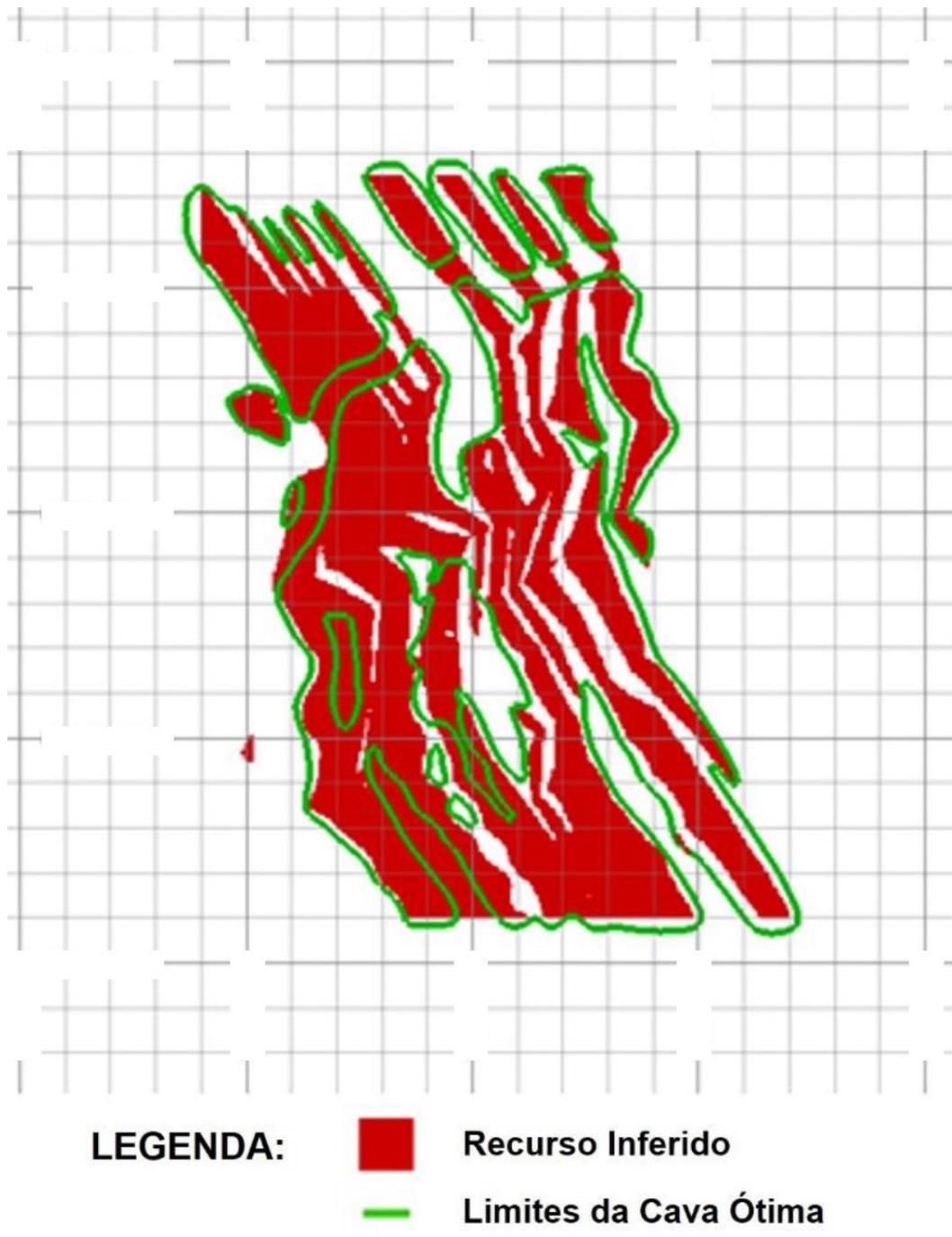


Figura 3-1 Recursos inferidos e limites da cava ótima.

Fonte: (Autor, 2025).

3.3 *Softwares utilizados*

Nas etapas do projeto, diferentes *softwares* especializados foram usados. O Whittle foi utilizado para a otimização de cava, fornecendo o melhor limite econômico de lavra. Já o Datamine Studio OP permitiu a operacionalização da cava, auxiliando no planejamento e melhor operacionalidade. A cubagem foi realizada com o SURPAC, software amplamente aplicado em cálculos volumétricos e modelagem geológica. Por fim, para a sistematização dos resultados e organização das informações em relatórios e planilhas, utilizou-se o Microsoft Excel, ferramenta essencial para análises comparativas.

A otimização da cava foi desenvolvida utilizando o *software* Whittle. O otimizador utiliza o algoritmo de Lerchs-Grossman para determinar a economicidade da cava com base nos dados de custo de lavra e processamento, receita por bloco e outros parâmetros.

A utilização de softwares especializados no planejamento mineiro é fundamental para garantir precisão, eficiência e confiabilidade no desenvolvimento de projetos. Nesse contexto, o Datamine Studio OP e o GEOVIA Surpac destacam-se como ferramentas complementares, amplamente aplicadas na indústria mineral. Enquanto o Datamine Studio OP oferece recursos robustos para a otimização de cavas, sequenciamento de lavra e análise econômica, o GEOVIA Surpac é reconhecido pela sua eficiência em modelagem geológica, estimativa de recursos e geração de modelos de blocos. A integração dos resultados obtidos por meio dessas duas plataformas possibilita uma visão abrangente do empreendimento, aliando análises geológicas detalhadas a estratégias de lavra otimizadas, o que contribui diretamente para a tomada de decisão e para a viabilidade técnica e econômica dos projetos de mineração (DATAMINE, 2023; DASSAULT SYSTÈMES, 2023).

3.4 **Operacionalização da Cava**

Com o objetivo de maximizar o aproveitamento econômico, uma etapa fundamental no planejamento estratégico de lavra é a otimização de cava, que envolve as seguintes fases para sua definição:

- definição da largura das bermas em diferentes níveis da jazida;
- determinação da largura das rampas de acesso, raio mínimo de curvatura, entre outros parâmetros;

- definição do ângulo de inclinação de cada rampa de acesso;
- cálculo do ângulo de face de bancada e da altura de bancada;
- cálculo do ângulo geral de talude;
- dimensionamento da praça mínima de trabalho, ou seja, a largura mínima para um avanço de lavra.

A implementação da etapa de operacionalização requer, de forma imprescindível, a definição das larguras das bermas para cada nível da cava. Segue tabela 3-1 com parâmetros de operacionalização.

Tabela 3-1: Parâmetros para Operacionalização.

Parâmetros	Valor	Unidade
Ângulo geral do talude	37,0	°
Ângulo da face da bancada	60,0	°
Altura da bancada	4,0	m
Largura da berma	3,5	m
Largura da rampa	12,0	m
Gradiente da rampa	10,0	%
Raio Mínimo de praça	30,0	m

Fonte: (Autor, 2025).

A cava apresentada na Figura 3-2 e na Figura 3-3 corresponde à cava matemática ótima em vista de planta e perspectiva, respectivamente, gerada por meio de *softwares* especializados em planejamento de mina, como MineSight, Datamine, Whittle, entre outros, que utilizam algoritmos como o de Lerchs-Grossmann.

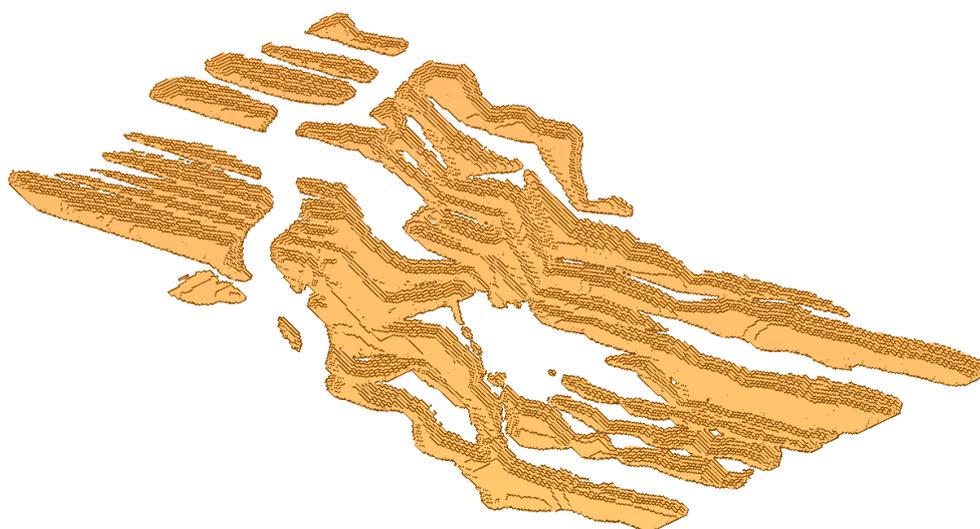


Figura 3-2: Cava Matemática elaborada no Whittle.

Fonte: (Autor, 2025).

Considerando que a cava matemática ótima (Figura 3-2) não leva em conta diversos fatores operacionais, torna-se necessário convertê-la em uma cava operacional. Essa conversão é fundamental para avaliar se a reserva é, de fato, economicamente viável para lavra. A partir da cava operacional final, será possível desenvolver todo o sequenciamento de lavra.

Com a cava matemática ótima em mãos, procede-se à criação das linhas-base (Figura 3-3), que servirão como referência para a operacionalização. Essas linhas representam o pé e crista de cada bancada da cava matemática e têm como objetivo reduzir ao mínimo a diferença entre a cava matemática ótima e a cava operacional, diferença esta conhecida como aderência. Todo processo de operacionalização foi feito com o software Datamine Studio OP.

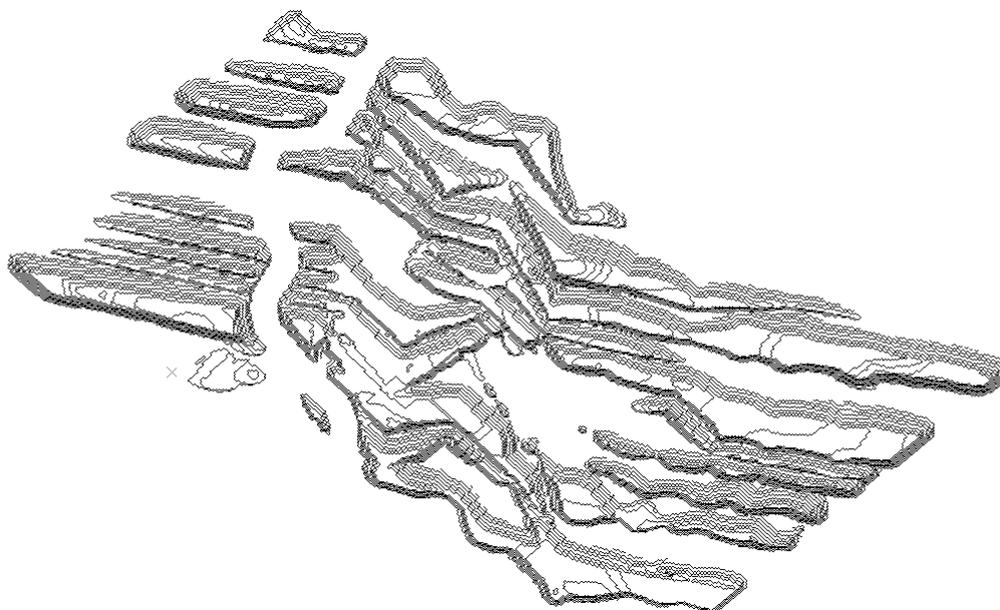


Figura 3-3: Linhas Cava Matemática.

Fonte: (Autor, 2025).

A operacionalização de uma cava pode ser conduzida de diferentes maneiras, dependendo da metodologia adotada pelo responsável pelo projeto. As duas estratégias mais utilizadas são a descendente e a ascendente. Nesse trabalho a cava foi operacionalizada de forma ascendente, pois dessa forma se consegue ser mais aderente a cava matemática devido ao fato das dimensões dos traços das bancadas de cotas inferiores sempre influenciarem na área mínima dos traços das bancadas de cotas superiores.

Também existe APP (Área de Proteção Permanente) que deve ser respeitada no momento da operacionalização, e no caso desse

projeto observa-se um rio passando pelo meio da cava, como mostra na Figura 3-4, onde a linha em azul é um *buffer* de 25 metros da APP e o polígono em marrom é a representação da cava.

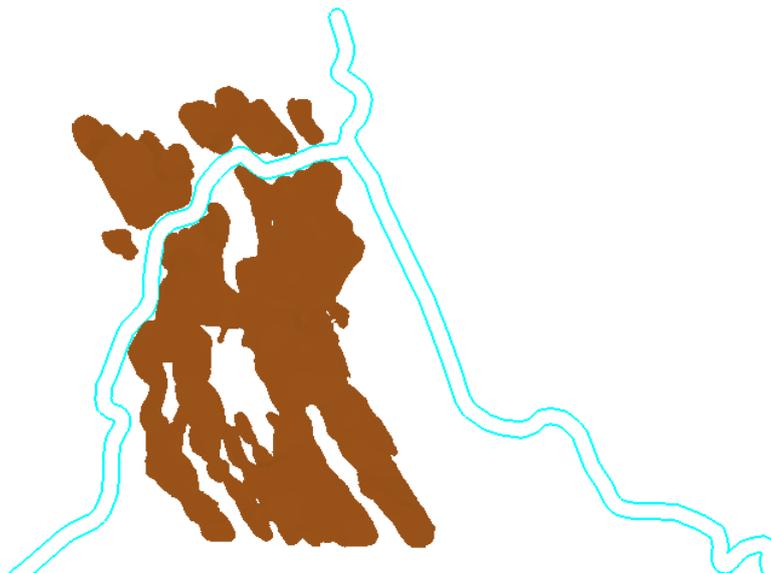


Figura 3-4: Área de Proteção Permanente

Fonte: (Autor, 2025)

Segue-se com a operacionalização da cava, adicionando novas rampas de acesso. O objetivo é fazer com que o projeto real se pareça o máximo possível com o modelo teórico. As rampas servem para ligar as bancadas, por isso são mais largas que as bermas. Para garantir que a recuperação do minério e a estabilidade da mina permaneçam em níveis ótimos, mantêm-se os padrões de segurança geotécnica. O ângulo das rampas deve ser mais suave, mas sem alterar a inclinação geral do talude.

Esse trabalho tem como objetivo uma operacionalização com uma movimentação mássica mínima de 95% no ROM, 140% no estéril e 120% na movimentação total.

3.5 Operacionalização da pilha de rejeito e estéril

O estéril lavrado será disposto em uma pilha específica, com volume estimado considerando um fator de compactação e empolamento de 15%. O rejeito proveniente da planta de beneficiamento será disposto em uma pilha de rejeito filtrado, com volume estimado considerando um fator de compactação e empolamento de 10%.

Os desenhos conceituais foram desenvolvidos utilizando parâmetros fornecidos pela empresa com base nas características dos materiais a serem dispostos e nas características

locacionais, bem como em operações com características similares, conforme apresentado na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Parâmetros para operacionalização de Pilhas.

Parâmetros	Estéril	Rejeito Filtrado	Unidade
Ângulo geral	29	14	°
Ângulo de bancada	37	26	°
Altura de bancada	10	10	m
Largura mínima de berma	5	20	m
Largura de rampas	12	12	m
Máxima inclinação de rampas	10	10	%
Raio mínimo de praça	30	30	m
Compactação e empolamento	15	10	%

Fonte: (Autor, 2025)

Para a localização da planta foi escolhido um ponto na região da mina onde se tem uma cota mais elevada, para facilitar o escoamento do rejeito, e com um *buffer* mínimo de 50 metros de áreas de proteção permanente para evitar problemas ambientais.

3.6 Cubagem

Após a geração do sólido da cava operacionalizada, realizou-se sua cubagem. Os dados foram extraídos no Studio OP e transferidos para o Excel. Nessa etapa, foi avaliado as massas de minério e estéril, comparando os resultados obtidos antes e depois da operacionalização da cava, assim como a REM de cada caso. Essa análise foi feita através da aderência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A operacionalização da cava representa um momento crucial no planejamento de lavra, pois consiste na transformação da cava matemática ótima em um modelo exequível, que considere aspectos práticos da mineração, como a definição de acessos, disposição de estéril, localização da planta de beneficiamento e demais estruturas. Esse procedimento é necessário para que a cava final não seja apenas um resultado teórico, mas que seja possível executar em campo, respeitando restrições técnicas, econômicas e ambientais. Além disso, a cubagem e a análise de aderência entre a cava operacional e a cava matemática permitem avaliar em que medida o planejamento preserva a viabilidade econômica do projeto, garantindo equilíbrio entre aproveitamento do minério e movimentação de estéril.

4.1 Análise da Operacionalização

Na Figura 4-1, é exibido o resultado da cava final operacional em perspectiva, e também na figura 4-2 em planta, obtidos a partir da operacionalização banco a banco e fundamentado nas linhas da cava matemática ótima.

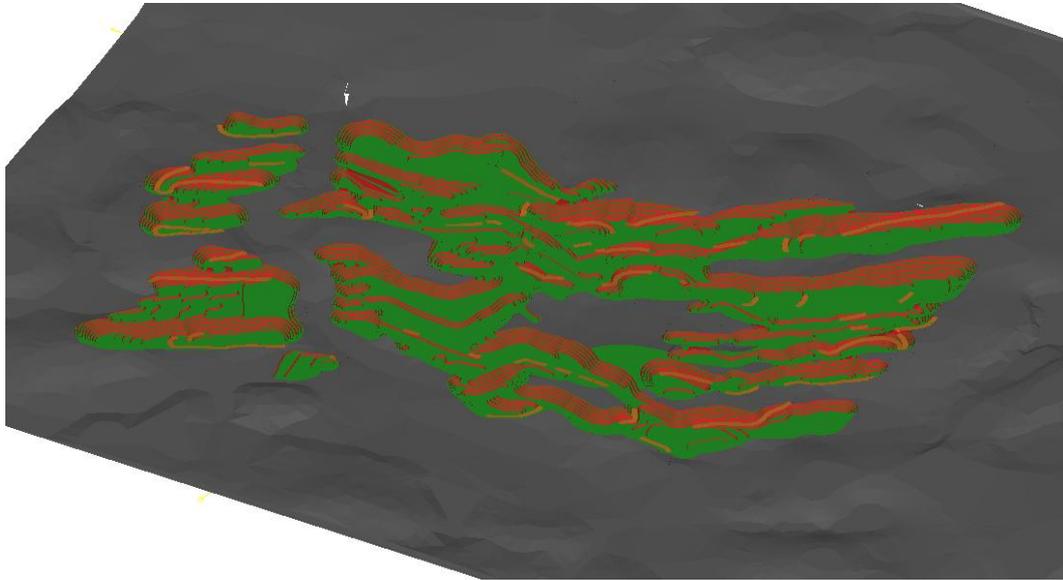


Figura 4-1: Imagem da Topografia da Cava Operacionalizada em perspectiva.

Fonte: (Autor, 2025).

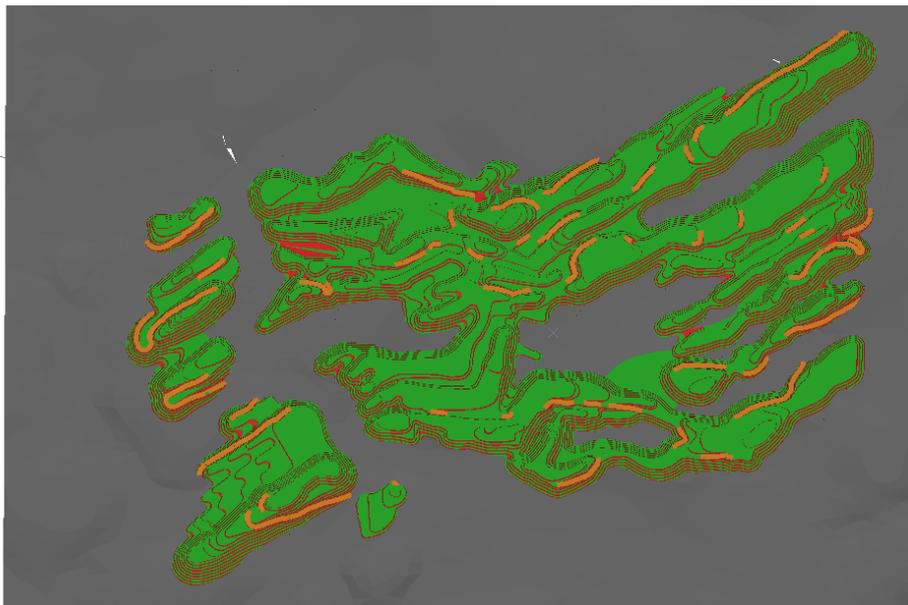


Figura 4-2: Imagem da Topografia da Cava Operacionalizada em Planta.

Fonte: (Autor, 2025).

As vias internas de acesso, representadas em laranja na Figura 4-1 e Figura 4-2, exercem papel importante no planejamento da cava, devendo ser posicionadas de forma a otimizar a logística de transporte e reduzir a distância média percorrida pelos equipamentos. Essa

estratégia impacta diretamente os custos operacionais, tanto no deslocamento do minério até a planta de beneficiamento quanto no envio do estéril às pilhas.

Definir com precisão os limites da cava final permitiu planejar adequadamente a localização de estruturas essenciais, como pilhas de estéril, barragens de rejeitos, unidades de processamento e demais instalações de apoio. Outro aspecto importante, ilustrado na Figura 4-3, é a relação entre a posição das frentes de lavra e os pontos de descarga do material: essas distâncias devem ser minimizadas para reduzir o custo de transporte, sem comprometer o acesso a áreas com potencial mineral, ou seja, diminuir o tamanho da DMT (linha em amarelo). Nesse projeto optou-se por usar caminhões de 30 toneladas para percorrer a DMT de 1,3 Km.

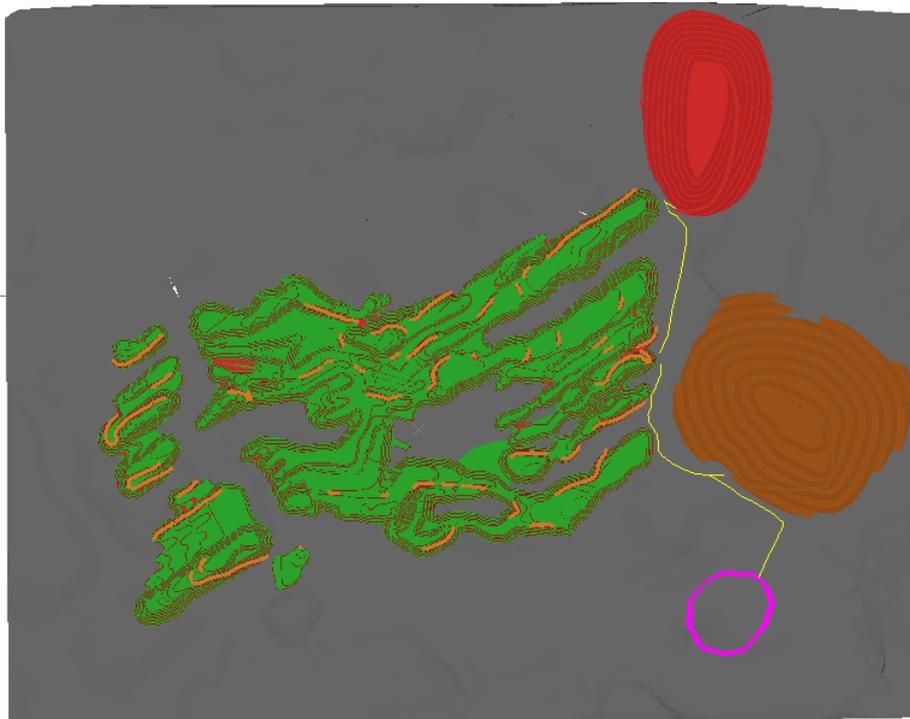


Figura 4-3: Cava Operacionalizada, pilhas de rejeito (marrom) e estéril (vermelha), área da planta (linha em rosa), e linha de DMT externas (linha em amarelo).

Fonte: (Autor, 2025).

Segue a Figura 4-4, que representa uma seção onde a linha verde representa a cava operacional e linha preta a cava matemática.

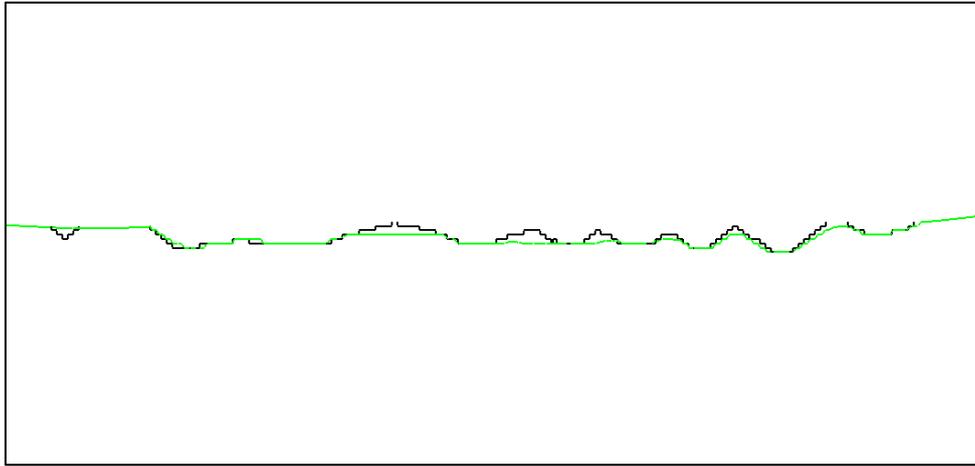


Figura 4-4: Seção Cava Operacional e Matemática.

Fonte: (Autor, 2025).

Segue Figura 4-5 onde se pode observar com maior detalhe uma seção na altura da crista dos bancos da cava operacionalizada, sendo a cava matemática representada pela linha preta e a cava operacional pela linha verde:

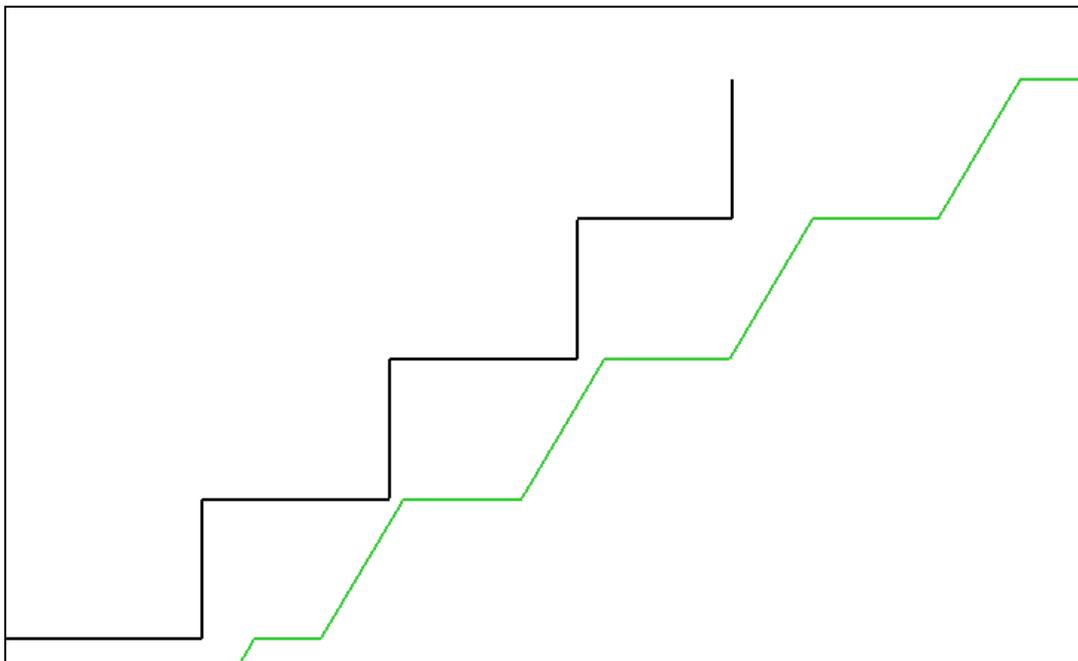


Figura 4-5: Seção na altura das cristas dos bancos da cava

Fonte: (Autor, 2025)

4.2 Cubagem

Quando terminada a operacionalização, foi feita a cubagem do sólido para se saber qual volume de estéril e minério será lavrado e assim podermos fazer a análise de aderência da operacionalização em relação a cava matemática. Observa-se na Figura 4-5 o sólido que foi cubado e na Figura 4-6 a visualização pelo programa usado para ela, SURPAC.

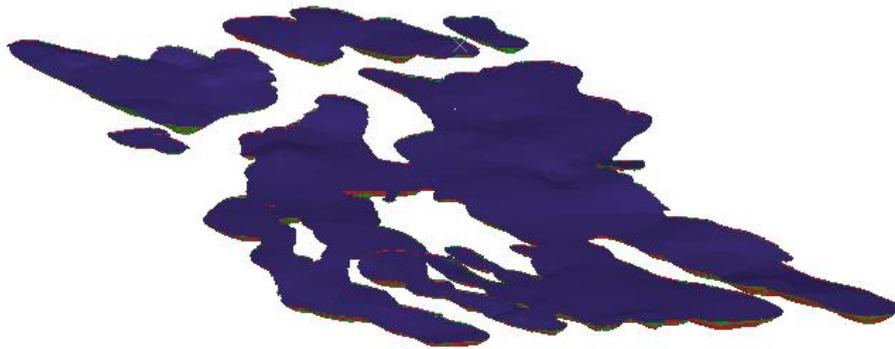


Figura 4-6: Sólido da Cava Operacional.

Fonte: (Autor, 2025)

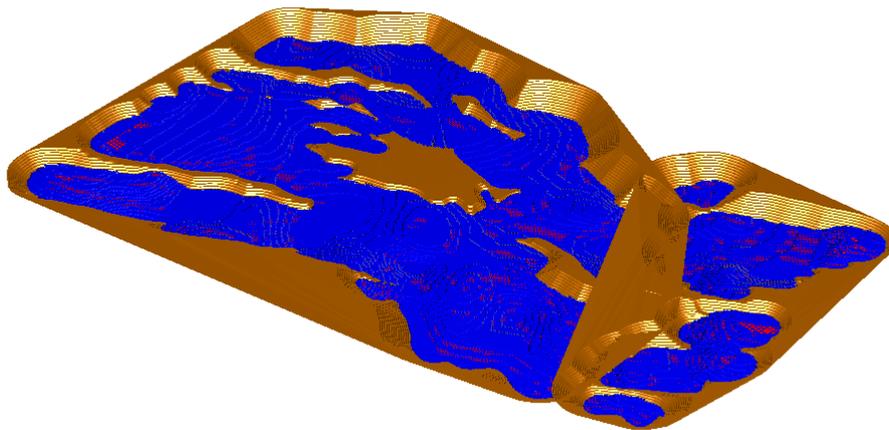


Figura 4-7: Imagem do *Software* SURPAC durante a cubagem.

Fonte: (Autor, 2025)

Observa-se na tabela 4-1 a seguir o resultado de cubagem da cava matemática e da cava operacionalizada.

Tabela 4-1- Resultados de cubagem

Tipo	Matemática	Operacionalizada	Unidade
ROM	31,5	30,1	Mt
Estéril	21,1	28,4	Mt
REM	0,7	0,9	-
Movimentação total	52,6	58,5	Mt

Fonte: (Autor, 2025).

4.3 Análise da Aderência

A aderência entre a cava operacional e o modelo matemático é um parâmetro fundamental, pois deve refletir o mínimo desvio possível entre as massas obtidas em ambos os casos. Para este projeto específico, considera-se aceitável uma redução de até 7% na massa de minério e um aumento máximo de 40% na massa de estéril, tomando como base os valores estimados na cubagem.

Observam-se na Tabela 4-2 os resultados da operacionalização, estimados a partir da Equação (1), sendo possível analisar a aderência da Cava Operacional à Cava matemática.

Tabela 4-2: Resultados de aderência.

Tipo	Aderência
ROM	96%
Estéril	135%
REM	141%
Movimentação total	111%

Fonte: (Autor, 2025).

A avaliação dos dados da Tabela 4-2 indica que o resultado mostrado na Figura 4-5 atende aos requisitos esperados. O cenário apresenta uma redução de 4% na massa de minério aproveitado, acompanhada por um aumento de 35% no material estéril movimentado. Logo o resultado foi satisfatório e foi alcançada uma operacionalização executável.

5 CONCLUSÃO

A mineração é uma das principais atividades econômicas do Brasil e está presente em várias regiões do país. O Brasil se destaca não só como grande produtor de minerais, mas também como um dos maiores consumidores. Porém, para alcançar bons resultados nesses empreendimentos, é essencial ter um planejamento de mina bem-feito.

Um dos maiores desafios desse planejamento é definir a cava operacionalizada, já que isso influencia diretamente no sucesso da mineradora. Os parâmetros escolhidos para operacionalizar a cava afetam tanto a análise quantitativa quanto a qualitativa da cubagem.

Para isso foram importados o modelo de blocos do depósito, a cava matemática e a topografia da área. Com esses dados, foi possível fazer a operacionalização e, ao final do projeto, realizar a cubagem e a análise de aderência, em que foi encontrado um resultado positivo e conseqüentemente o objetivo do trabalho foi atingido.

Aos interessados em continuar o estudo, se indica o sequenciamento de cava, posteriormente o dimensionamento de frota para a mina e por fim o plano de fechamento de mina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRE, Francis I.; BILLY, Romain G.; LOPEZ, Fernando A.; MÜLLER, Daniel. **Limits to graphite supply in a transition to a post-fossil society. Resources, Conservation and Recycling**, v. 208, 2024.

CURI, A. Minas A Céu Aberto - **Planejamento de Lavra**. Oficina de Textos, São Paulo, 2014.

DASSAULT SYSTÈMES. **GEOVIA Surpac: Geology & Mine Planning Software**. Disponível em: <https://www.3ds.com/products/simulia/geovia/surpac>. Acesso em: 28 ago. 2025.

DATAMINE. **Studio OP: Strategic Open Pit Mine Planning**. Disponível em: <https://www.dataminesoftware.com/studio-op/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

FONTES, M. P. **Influência do nível freático no sequenciamento de lavra aplicado ao planejamento estratégico de lavra**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

GIURCO, Damien; DOMINISH, Elsa; FLORIN, Nick; WATARI, Takuma; McLELLAN, Benjamin. **Requirements for minerals and metals for 100% renewable scenarios**. In: TESKE, S. (org.). *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. Springer Open, p. 437-457, 2019.

GRIEBELER, Eder Eidolon. **Aplicação do software MineSight em mineração a céu aberto**. Salão de Iniciação Científica (22.: 2010 out. 18-22: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2010., 2010.

HAQUE, Md Aminul; TOPAL, Erkan; LILFORD, Eric. **Evaluation of a mining project under the joint effect of commodity price and exchange rate uncertainties using real options valuation**. *The Engineering Economist*, 2017.

MENEZES, D. D. S. **Construção de acessos e rampas em minas a céu aberto: estudo de caso: Mineração buritirama**. 2010.

MOREIRA, Rodrigo Iuri Morais. **Avaliação da influência dos tipos de acessos na distância média de transporte, aderência volumétrica e ângulos globais no desenvolvimento da mineração a céu aberto**. 2024.

PARK, Junhyeok; CHO, Seon-Jun; SHIN, Seungwook; KIM, Rina; SHIN, Dongbok; SHIN, Youngjae. **Overview of graphite supply chain and its challenges.** Geosciences Journal, 2025.

PINTO, C. L., & DUTRA, J. I. **Introdução ao planejamento e operação de lavra.** Universidade Corporativa Chemtech, Belo Horizonte, MG, 2008.

SIMONI, Marcus Vinícius Barros de. **Planejamento de longo prazo em mina de bauxita: trade off entre a ordem da operação em platôs de bauxita.** 2018. Monografia Graduação UFOP.

SOUZA, Felipe Ribeiro. **Sequenciamento direto de blocos: impactos, limitações e benefícios para aderência ao planejamento de lavra.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2023: Graphite (Natural).** Reston: U.S. Department of the Interior, 2023.

WEBER, Leopold. **On the security of graphite supply.** Mineralogy and Petrology, v. 117, p. 387–399, 2023.

WHITTLE, David. **Whittle Strategic Mine Planning Course Notes.** Tradução Humberto de Oliveira Machado. Belo Horizonte, 2006.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. **Rock Slope Engineering.** CRC Press, 2004.