



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

**ANA LUIZA MONTEIRO DE ÁVILA**

**IMPACTO DA LARGURA DOS PAINÉIS NA PRODUTIVIDADE E  
NOS CUSTOS EM UMA MINA HIPOTÉTICA DE FOSFATO A CÉU  
ABERTO PARA O MÉTODO DE LAVRA TERRACE MINING**

**ARAXÁ-MG**

**2025**

**ANA LUIZA MONTEIRO DE ÁVILA**

**IMPACTO DA LARGURA DOS PAINÉIS NA PRODUTIVIDADE E NOS  
CUSTOS EM UMA MINA HIPOTÉTICA DE FOSFATO A CÉU ABERTO  
PARA O MÉTODO DE LAVRA TERRACE MINING**

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

Orientador: Guilherme Alzamora Mendonça

Coorientadora: Mariana Paula Rossini De Oliveira

**ARAXÁ-MG**

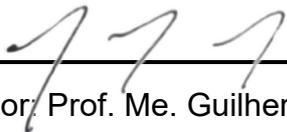
**2025**

**ANA LUIZA MONTEIRO DE ÁVILA**

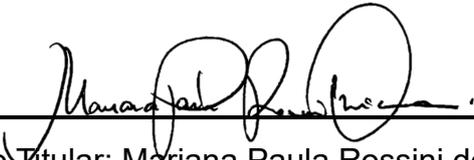
**IMPACTO DA LARGURA DOS PAINÉIS NA PRODUTIVIDADE E NOS  
CUSTOS EM UMA MINA HIPOTÉTICA DE FOSFATO A CÉU ABERTO  
PARA O MÉTODO DE LAVRA TERRACE MINING**

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

Data da Defesa: Araxá, 14 de fevereiro de 2025.

  
Presidente e Orientador: Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG –  
Unidade Araxá

  
Membro Titular: Mariana Paula Rossini de Oliveira

Mosaic Company

Documento assinado digitalmente



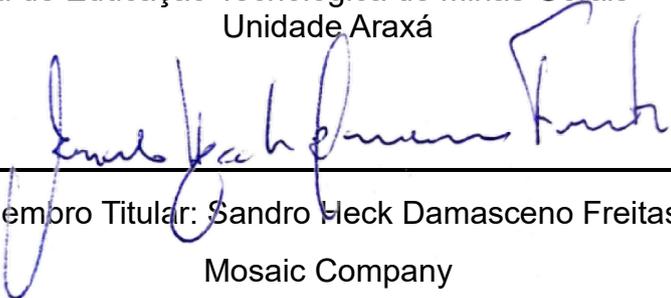
SILVANIA ALVES BRAGA DE CASTRO

Data: 25/02/2025 18:52:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Titular: Prof. Dr. Sylvania Alves Braga

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG –  
Unidade Araxá

  
Membro Titular: Sandro Heck Damasceno Freitas

Mosaic Company

## **Agradecimentos**

A jornada para a conclusão deste trabalho foi desafiadora e enriquecedora, e não teria sido possível sem o apoio de diversas pessoas e da instituição.

Primeiramente, agradeço a Deus pela força, paciência e perseverança nos momentos difíceis.

Aos meus familiares, agradeço pelo cuidado, incentivo e compreensão durante esta caminhada. Seu apoio foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Agradeço ao meu orientador, Guilherme Alzamora Mendonça, e à coorientadora, Mariana Paula Rossini de Oliveira, pela dedicação, paciência e pelo compartilhamento de seu conhecimento, sempre se dispondo a me guiar com sabedoria e comprometimento.

Aos membros da banca, Sandro Heck Damasceno Freitas e Silvânia Alves de Braga Castro, agradeço por se disponibilizarem para contribuir com este trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), unidade Araxá, que foi fundamental para minha formação acadêmica e foi minha casa por tantos anos, com excelentes professores que me inspiraram com suas aulas e experiências.

Aos meus colegas e amigos, que estiveram ao meu lado, compartilhando desafios, dúvidas e conquistas. O apoio e as trocas de conhecimento tornaram essa jornada mais leve e significativa.

Por fim, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

## Epígrafe

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais  
voltará ao seu tamanho original”

Albert Eisten

## Resumo

A escolha do método de lavra e de seus parâmetros operacionais como a geometria da cava, equipamentos a serem utilizados e condições geotécnicas afetam diretamente a eficiência e a viabilidade econômica de um projeto de mineração. Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da largura dos painéis na produtividade, fluxo de caixa econômico e na frota de equipamentos de carregamento e transporte de uma mina de fosfato a céu aberto utilizando os princípios do método de lavra *Terrace Mining*. Os painéis na mineração organizam e otimizam operações, maximizam a recuperação de recursos, reduzem impactos ambientais e gerenciam riscos. O planejamento adequado dos painéis pode reduzir custos operacionais e melhorar a eficiência do empreendimento. O estudo visa otimizar a extração mineral ao potencializar as operações de lavra e melhorar condições operacionais. A lacuna identificada reside na ausência de um método para a definição mais precisa e eficiente da largura dos painéis a serem executados na fase de lavra. Para suprir essa necessidade, a pesquisa adota uma abordagem qualitativa e quantitativa, envolvendo revisão de literatura e simulações práticas para avaliar o desempenho do *Terrace Mining* em um depósito hipotético. A metodologia inclui a aplicação de critérios de avaliação como produtividade, recuperação mineral, custos operacionais e intensidade de lavra, além da avaliação do fluxo de caixa descontado, a partir do plano de produção gerado nos diferentes cenários simulados, bem como o dimensionamento da frota de carga e transporte em cada um desses cenários. A análise dos resultados indica que a largura dos painéis influencia significativamente os cenários estudados, sendo a configuração ideal de até 400m, neste caso, a frota necessária de caminhões CAT 775 é de, no máximo, 29 máquinas, enquanto para os painéis de 600m demandam 48 caminhões. Conclui-se que este estudo pode fornecer informações, como a variação na produtividade em função da alteração na largura dos painéis para engenheiros de minas e tomadores de decisão, contribuindo para operações mais eficientes.

**Palavras-chave:** Terrace Mining; Lavra a céu aberto; Painéis; Produtividade; Custos operacionais.

## **Abstract**

The choice of the mining method and its operational parameters, such as pit geometry, equipment to be used and geotechnical conditions, directly affects the efficiency and economic viability of a mining project. This work aims to analyze the impact of panel width on productivity, economic cash flow and fleet loading and transportation equipment for an open-pit phosphate mine, applying the principles of the Terrace Mining method. Panels in mining organize and optimize operations, maximize resource recovery, reduce environmental impacts, and manage risks. Proper planning of panels can reduce operating costs and enhance the project's efficiency. The study aims to optimize mineral extraction by enhancing mining operations and improving operational conditions. The identified gap lies in the absence of a method for more precise and efficient determination of the panel widths to be executed during the mining phase. To address this need, the research adopts a qualitative and quantitative approach, involving literature review and practical simulations to evaluate the performance of Terrace Mining in a hypothetical deposit. The methodology includes applying evaluation criteria such as productivity, mineral recovery, operating costs and mining intensity, as well as assessing discounted cash flow based on the production plan generated in the different simulated scenarios, along with the sizing of the loading and transportation fleet in each of these scenarios. The analysis of the results indicates that panel width significantly influences the studied scenarios, with the optimal configuration being up to 400 meters. In this case, the required CAT 775 truck fleet is a maximum of 29 trucks, while 600-meter panels require 48 trucks. It is concluded that this study can provide insights, such as the variation in productivity due to the change in panel width for mine engineers and decision makers, contributing to more efficient operations.

**Keywords:** Terrace Mining; Open-pit mining; Panels; Productivity; Operating costs.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Esquematização lavra em tiras .....	14
Figura 3-2: Esquematização Terrace Mining .....	15
Figura 3-3: Escavadeira CAT 336.....	20
Figura 3-4: Caminhão Scania G500 .....	20
Figura 3-5: Escavadeira CAT 395.....	21
Figura 3-6: Caminhão CAT 775.....	21
Figura 4-1: Fases primeiro cenário.....	23
Figura 4-2: Fases segundo cenário .....	23
Figura 4-3: Fases terceiro cenário.....	24
Figura 4-4: Seções cenários.....	25
Figura 5-1: Gráfico movimentação por fase - Cenário 1.....	28
Figura 5-2: Gráfico movimentação por fase - Cenário 2.....	29
Figura 5-3: Gráfico movimentação por fase - Cenário 3.....	30
Figura 5-4: Gráfico plano movimentação anual - Cenário 1 .....	31
Figura 5-5: Gráfico plano movimentação anual - Cenário 2 .....	32
Figura 5-6: Gráfico plano movimentação anual - Cenário 3 .....	32
Figura 5-7: Variação custo estéril fixo ao longo do tempo .....	33
Figura 5-8: Movimentação Estéril.....	34
Figura 5-9: Comparação quantidade CAT 336 .....	35
Figura 5-10: Comparação quantidade CAT 395 .....	35
Figura 5-11: Comparação quantidade Scania G500 .....	36
Figura 5-12: Comparação quantidade CAT 775 .....	37

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	9
2. OBJETIVOS .....	11
3. REFERENCIAL TEÓRICO .....	12
3.1 Principais métodos de lavra .....	12
3.2 Terrace Mining .....	14
3.2.1 Princípios do Terrace Mining .....	15
3.2.2 Definição e importância dos painéis na mineração .....	16
3.2.3 Relação entre a largura dos painéis e outros parâmetros .....	17
3.2.4 O Software .....	18
3.2.5 Equipamentos .....	19
4. METODOLOGIA.....	22
4.1 Simulações .....	22
5. RESULTADOS .....	27
5.1 Cubagem .....	27
5.2 Plano de movimentação.....	30
5.3 Variação custo estéril fixo .....	33
5.4 Frota carga.....	34
5.5 Frota transporte.....	36
6. DISCUSSÃO .....	37
7. CONCLUSÃO .....	39

# 1. INTRODUÇÃO

A mineração, é uma atividade essencial para a extração de matérias-primas como minério de ferro, fosfato, carvão mineral, entre outros e desempenha um papel vital para o desenvolvimento não somente econômico, mas também tecnológico, fornecendo os bens minerais essenciais e necessários para a indústria. No Brasil, a mineração desempenha um papel significativo na economia, sendo responsável por uma parcela considerável do PIB (Produto Interno Bruto) e gerando milhares de empregos. Em 2023 a mineração contribuiu com o total de R\$248,2 bilhões para o PIB, Minas Gerais é o estado que apresentou a maior participação no faturamento, ela foi de 41,7%. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de minerais como ferro, bauxita e níquel, consolidando-se como um importante participante no mercado global de mineração (IBRAM, 2023).

A mineração, além de sua importância econômica, enfrenta desafios técnicos que exigem a exploração de métodos alternativos ou o aprimoramento de técnicas existentes, já que métodos tradicionais nem sempre são viáveis em todos os contextos geológicos e topográficos. Isso demanda a exploração de alternativas como o *terrace mining*, um método de lavra a céu aberto menos comum. Este método envolve a escavação de terraços ou patamares, painéis sucessivos que seguem o contorno natural do terreno, permitindo a extração em regiões onde outros métodos seriam impraticáveis. O *terrace mining* é especialmente eficaz em terrenos inclinados, pois os terraços são projetados para minimizar a movimentação excessiva de estéril e reduzir o impacto ambiental. Uma das principais características desse método é o seu rápido avanço vertical, permitindo que grandes volumes de material sejam removidos rapidamente, facilitando o acesso a camadas mais profundas do depósito mineral em um curto período (Johnson *et al.*, 2021).

Em relação à definição da largura dos painéis, assim como descrito por Meagher *et al.* (2014) em seu artigo, a otimização do design de mina a céu aberto tradicionalmente envolve a definição dos limites finais da cava, que determinam o que será extraído, e a divisão da cava em volumes menores, conhecidos como *pushbacks* ou fases. No caso do presente trabalho, esses volumes são chamados de painéis. Portanto, a

primeira fase para se definir a largura dos painéis é a definição da cava final. De acordo com Araya *et al.* (2013), três aspectos principais devem ser considerados ao definir o *pushback* de um projeto: (1) variáveis geomecânicas, como ângulos finais da cava, ângulos entre rampas e ângulos das faces das bancadas; (2) a taxa máxima de extração necessária, incluindo minério e estéril; e (3) o tamanho e tipo de equipamento operacional, que determina a largura mínima das bancadas. Se as condições geomecânicas forem favoráveis e a taxa de extração necessária for alcançada pela frota de equipamentos disponível, o design final do *pushback* será limitado ao espaço mínimo necessário para a operação dos equipamentos. Com base nessas ideias, percebe-se a importância de uma definição precisa da largura dos painéis, tema que será abordado com mais detalhes nos próximos capítulos deste trabalho.

Sendo assim, o trabalho pretende preencher a lacuna na literatura em relação à metodologia de definição da largura dos painéis, destacando sua importância e impacto na lavra ao analisar o método de lavra *terrace mining* aplicado a depósitos de fosfato. A análise incluirá critérios como produtividade e custos operacionais, permitindo avaliar como variações nos parâmetros, como dimensões dos painéis influenciam a eficiência e o fluxo de caixa das operações e ainda sua influência na quantidade de equipamentos de carga e transporte que serão utilizados para a movimentação de estéril e minério, e como equipamentos de diferentes capacidades se comportam nesses cenários.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar como a variação das dimensões dos painéis de lavra influencia a produtividade, os custos operacionais e o fluxo de caixa econômico dos cenários de lavra, aplicando os princípios do método de lavra *terrace mining* na exploração de um depósito hipotético de fosfato. Para isso, busca-se:

1. Apresentar uma revisão bibliográfica sobre o método *terrace mining*.
2. Executar sequenciamento matemático para realizar análises qualitativas e quantitativas, simulando cenários e avaliando o desempenho operacional do método proposto.
3. Analisar o impacto da capacidade e quantidade dos equipamentos de carga e transporte na lavra de cada cenário, de acordo com a variação da largura dos painéis.

Dessa forma, espera-se contribuir para um melhor entendimento da importância da definição adequada da largura dos painéis para a lavra, a partir dos conceitos do método *terrace mining*, oferecendo uma base para a tomada de decisões mais embasada para projetos de mineração de fosfato.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico deste trabalho visa fornecer uma base sólida para a compreensão dos métodos de lavra a céu aberto, com ênfase no método *terrace mining*. Este capítulo está dividido em duas partes principais: a primeira aborda os principais métodos de lavra, enquanto a segunda se concentra no *terrace mining*, detalhando seus princípios, a importância dos painéis e a relação entre a largura dos painéis e outros parâmetros.

#### 3.1 Principais métodos de lavra

De acordo com Curi (2017), a lavra compreende o conjunto de operações necessárias para o aproveitamento de uma jazida mineral, sendo a quarta etapa da mineração, após a prospecção, exploração e desenvolvimento. Também conhecida como exploração, os métodos de lavra consistem na coordenação sistemática das diversas operações para otimizar o aproveitamento da jazida.

A escolha do método de lavra ideal depende da análise da geometria da jazida e da determinação da sequência de extração. Além disso, a definição das tecnologias, equipamentos, materiais e energia necessários é um complemento importante ao método escolhido. O método mais eficiente seria aquele que combinasse economia, segurança, completude e baixo impacto ambiental.

Estima-se que mais de 90% da produção em lavra a céu aberto no mundo provenha dos métodos de lavra em bancadas e em tiras (Curi, 2017), abrangendo a extração de carvão, rochas industriais e minérios metálicos. Esses métodos se destacam pela alta eficiência na remoção de grandes volumes de material e se consolidam como os mais utilizados na mineração a céu aberto, devido à sua relevância na indústria mineral e à elevada tonelagem extraída.

Dessa forma, diversos métodos de lavra a céu aberto podem ser aplicados conforme as condições do depósito, sendo a lavra em bancadas e em tiras os principais destaques. A seguir, apresenta-se uma breve explicação sobre esses métodos.

- Lavra em bancadas (*Open Pit Mining*)

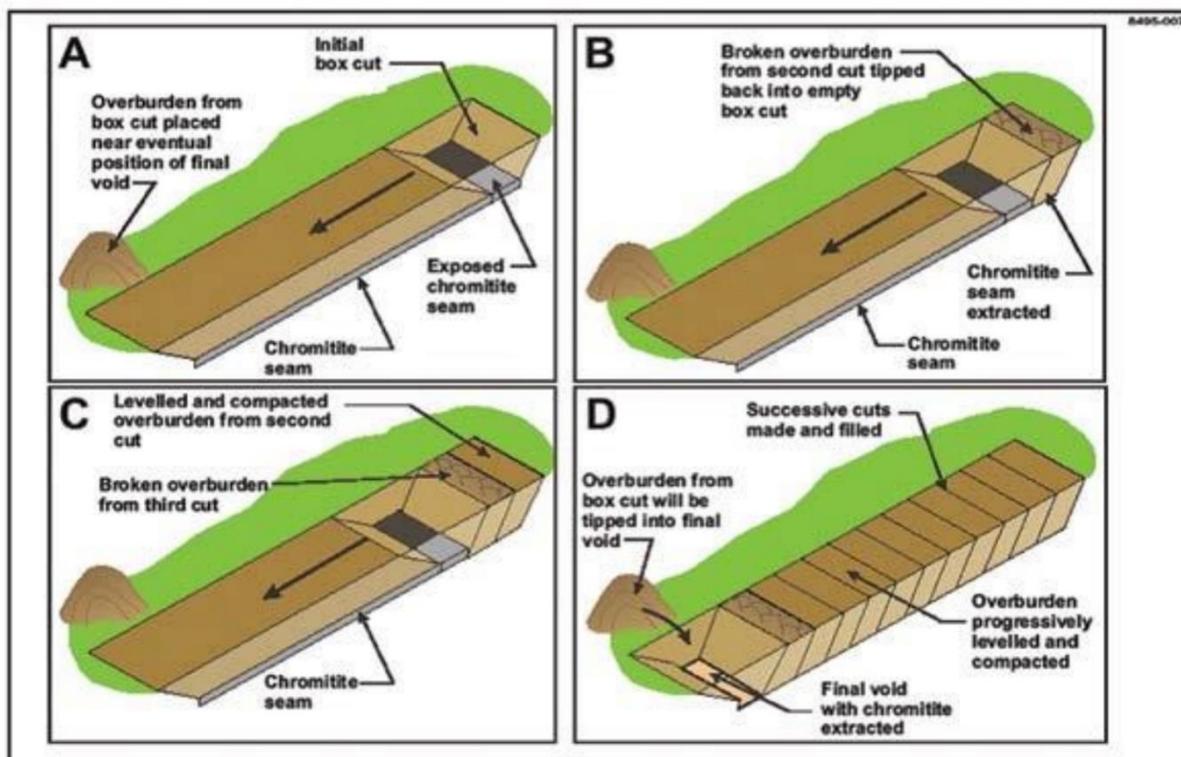
Método mais utilizados na mineração, adequado para depósitos próximos à superfície, com geometria tridimensional (não necessariamente camadas horizontais), envolvendo a criação de uma cava, grande escavação em forma de funil ou concha, criada para acessar e extrair minério dos depósitos. Esta cava é composta por uma série de bancos ou degraus escavados em diferentes níveis de profundidade, que facilitam tanto o acesso ao minério quanto a remoção segura do material estéril (*overburden*).

- Lavra em tiras (*Strip Mining*)

Segundo Hartman (1987), o método de lavra em tiras (*strip mining*), esquematizado na figura 3-1, é amplamente utilizado em depósitos superficiais e que apresentam uma horizontalidade acentuada, facilitando a remoção das camadas de solo e rocha que cobrem o minério como carvão. Ele consiste na remoção sequencial de camadas de estéril para expor o minério, extraíndo-o em faixas longas. Após a lavra de uma tira, o estéril da próxima escavação é depositado na área já explorada, promovendo a recuperação ambiental progressiva do terreno. Esse método é eficiente para depósitos extensos e de baixa profundidade, onde a remoção contínua do estéril é tecnicamente viável e economicamente vantajosa.

A principal diferença entre *strip mining* e *terrace mining* está na geometria da lavra e na aplicação a diferentes tipos de depósitos. Enquanto o *strip mining* é mais adequado para depósitos horizontais e extensos, onde o minério pode ser extraído em grandes faixas longitudinais, o *terrace mining* é utilizado em terrenos inclinados ou de geometria variável, sendo caracterizado por terraços sucessivos que facilitam o controle da estabilidade dos taludes e o transporte do minério por meio de rampas e bermas. Assim, o *strip mining* prioriza a extração eficiente em camadas contínuas, enquanto o *terrace mining* exige um planejamento detalhado das frentes de lavra para adaptação ao relevo.

Figura 3-1: Esquemática lavra em tiras



Fonte: Luciana Abichequer

### 3.2 Terrace Mining

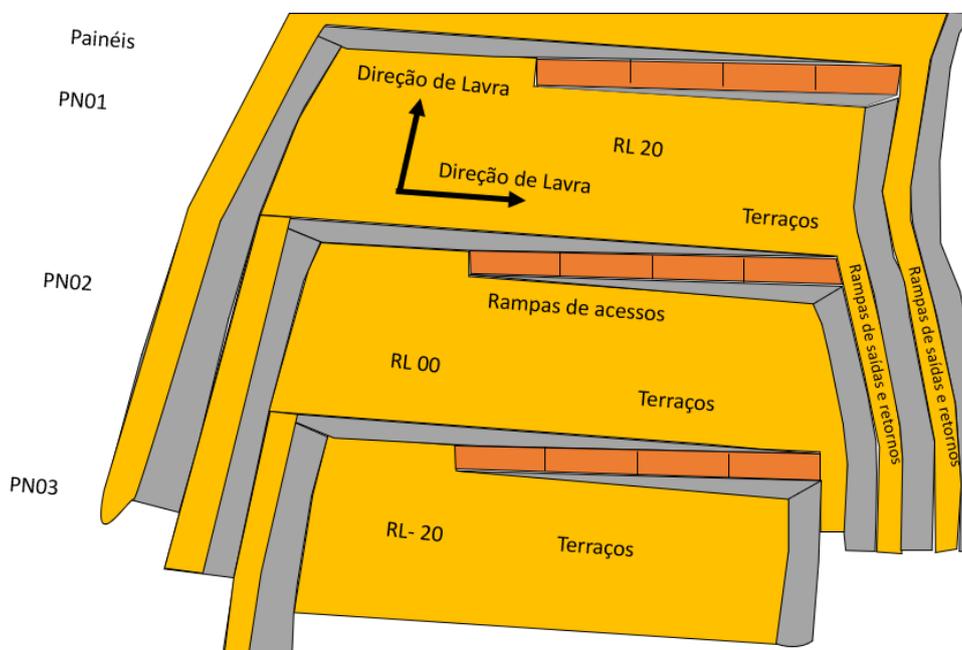
O *terrace mining*, esquematizado na figura 3-2, é um método de lavra a céu aberto menos comum e é utilizado em situações em que há coberturas espessas ou quando o minério apresenta um mergulho íngreme e opera com múltiplas bancadas tanto para o minério quanto para o material estéril. A mina avança através do depósito, mas não necessariamente em um único banco, sendo uma operação de múltiplos estágios. O número de bancadas depende da profundidade da escavação, com alturas variando entre 10 e 15 metros e podendo ter de 1 a 32 bancadas em forma de terraço (Rocha, 2017).

Este método faz parte do sistema de lavra *Haulback*, ou seja, o material estéril é depositado na direção oposta à frente de lavra, portanto, é depositado nos painéis já lavrados. Essa prática ajuda a manter a frente de lavra organizada e reduz a necessidade de criar áreas de depósito, minimizando o impacto ambiental (Mitra; Serkan Saydam, 2012).

O sistema *haulback* pode ser mais eficiente em termos de custos e tempo, pois reduz a distância de transporte do material estéril, resultando em menor consumo de

combustível e desgaste dos equipamentos. À medida que o material estéril é depositado em áreas já mineradas, essas áreas podem ser progressivamente reabilitadas. Isso facilita a recuperação ambiental e a restauração do terreno.

Figura 3-2: Esquemática Terrace Mining



Fonte: Adaptado de material interno

### 3.2.1 Princípios do Terrace Mining

Os princípios do *terrace mining* envolvem a escavação de terraços ou patamares sucessivos que seguem o contorno natural do terreno. Este método permite a extração eficiente em regiões onde outros métodos seriam impraticáveis, minimizando a movimentação de estéril e reduzindo o impacto ambiental.

O *terrace mining* adapta-se a terrenos inclinados ou complexos, onde a topografia irregular e o maciço rochoso dificultam a aplicação de métodos convencionais de lavra a céu aberto. Este método consiste na criação de terraços sucessivos ao longo das encostas, permitindo a extração progressiva do minério em diferentes níveis, o que proporciona melhor controle de estabilidade geotécnica e maior segurança operacional.

A configuração dos terraços segue o relevo natural do depósito e, à medida que a mineração avança, cada nível é projetado para facilitar o transporte contínuo do minério, utilizando sistemas de escavação e transporte eficientes, como correias

transportadoras ou sistemas mecanizados. Isso reduz a necessidade de movimentação frequente de caminhões, otimizando a operação.

Além disso, o método é eficaz em depósitos estratificados ou com grande espessura de estéril, como descrito por Carter (1980), que enfatiza a importância de adequar os *layouts* da mina e o equipamento às condições geológicas específicas de cada local.

Esses princípios fazem do *terrace mining* uma alternativa viável para operações em áreas montanhosas ou com depósitos de inclinação acentuada, priorizando a segurança e a produtividade ao lidar com as particularidades geotécnicas do terreno. A flexibilidade para depósitos estratificados e a minimização de impactos ambientais são características adicionais que tornam este método especialmente vantajoso.

### **3.2.2 Definição e importância dos painéis na mineração**

Na mineração por escavação em terraços, também conhecida como *terrace mining*, os painéis são seções específicas ou blocos de material mineralizado que dividem a cava em unidades menores, cada uma com sua própria frente de trabalho, sendo extraídos de maneira sistemática e organizada. Cada painel representa uma parte do depósito mineral abordada de forma metódica, seguindo um planejamento estratégico. Esse método é fundamental para a mineração em rampas ou terraços, onde o terreno é escavado em camadas horizontais, geralmente acompanhando a inclinação natural do terreno.

A importância dos painéis na mineração é multifacetada. Eles facilitam a organização e o planejamento das operações, melhoram a segurança ao prevenir colapsos e manter a estabilidade das escavações, e maximizam a recuperação dos recursos, garantindo uma extração mais eficiente dos minerais valiosos. Além disso, contribuem para a minimização dos impactos ambientais, permitindo um gerenciamento mais eficaz dos resíduos e facilitando a restauração das áreas mineradas. Economicamente, a abordagem dos painéis pode reduzir os custos operacionais e aumentar a eficiência das atividades mineradoras, além de aprimorar a gestão de riscos geotécnicos.

Em suma, a utilização de painéis na mineração por terraços oferece uma abordagem estruturada e controlada para a extração de minerais, trazendo benefícios em termos

de organização, recuperação de recursos, impacto ambiental e eficiência econômica, ao mesmo tempo em que melhora a gestão de riscos associados à operação.

### **3.2.3 Relação entre a largura dos painéis e outros parâmetros**

A largura dos painéis na mineração por escavação em terraços é um parâmetro essencial que afeta a estabilidade geotécnica, a eficiência da extração, a segurança operacional e o controle ambiental. De acordo com Nancel-Penard; Morales, 2021, sua escolha é uma tarefa complexa que requer a consideração simultânea de vários elementos, como a geometria de cada fase e a distância necessária entre os limites das fases subsequentes para permitir o acesso e a operação de grandes equipamentos. Além disso, é importante considerar a tonelagem de materiais contidos e garantir que o cronograma de produção seja eficiente, maximizando o valor presente líquido.

Painéis muito estreitos aumentam o risco de colapsos, enquanto painéis muito largos podem comprometer a integridade estrutural do terreno. Além disso, a largura influencia diretamente a escolha dos equipamentos, pois painéis mais amplos permitem o uso de máquinas de maior porte, otimizando a extração e reduzindo o tempo de operação. Entretanto, é necessário equilibrar essa eficiência com a capacidade de manobra dos equipamentos e a logística de transporte.

A segurança dos trabalhadores também é impactada pela largura dos painéis, que deve garantir espaço adequado para movimentação e implementação de medidas de segurança. Além disso, painéis mais largos geram maior volume de material de sobrecarga, exigindo planejamento para minimizar impactos ambientais e facilitar a recuperação da área minerada.

Do ponto de vista econômico, painéis mais largos podem reduzir os custos de extração por tonelada, mas exigem maior investimento em infraestrutura e equipamentos. Além disso, a largura dos painéis e a inclinação do corpo mineralizado influenciam a relação estéril/minério, o porte dos equipamentos e o sequenciamento da lavra, sendo essenciais para a otimização da operação. Dessa forma, a definição da largura ideal deve equilibrar fatores técnicos, operacionais e econômicos.

A incerteza na definição dessas larguras pode ser minimizada por meio de estudos técnicos detalhados, consultas a especialistas e revisão de literatura, garantindo um planejamento eficiente e sustentável da lavra.

A falta de uma metodologia padronizada na indústria para otimização desses projetos pode resultar em resultados inconsistentes e menos eficientes.

### **3.2.4 O Software**

Para a realização dos testes relacionados à lavra do depósito e seu sequenciamento foram utilizados softwares fornecidos pela empresa australiana Deswik.

A Deswik® oferece uma ampla gama de funcionalidades através de seus diversos produtos, os quais são projetados para funcionar de forma integrada, permitindo uma troca de informações contínua e precisa entre diferentes elementos do plano de mina, como geologia, design e sequenciamento, sendo alguns deles:

- Deswik.CAD: Ferramenta de design e modelagem de sólidos 3D.
- Deswik.Sched: Ferramenta de agendamento baseada em gráficos de Gantt para sequenciamento de atividades de mineração.
- Deswik.OPS: Planejamento e controle de operações em tempo real.
- Deswik.MDM: Gerenciamento de dados de mineração.

Os dois softwares aplicados no desenvolvimento do trabalho foi o Deswik.CAD e o Deswik.Sched.

O Deswik.CAD é um software de design de modelagem bastante utilizado no ramo da mineração, oferecendo funcionalidades voltadas para o design de mina, modelagem geológica e planejamento operacional. Sua vantagem é ser um software inteiramente customizável e atender tanto demandas de curto prazo quanto de longo prazo.

As principais características do Deswik.CAD são:

- Modelagem de Superfície e Sólidos.
- Design de mina.
- Integração de dados.
- Otimização de lavra.
- Automação de tarefas repetitivas.

- Visualização 3D avançada.

No trabalho, ele foi utilizado para realizar a cubagem (cálculo de volume) e a divisão das fases para organização da progressão inicial da lavra.

Já o Deswik.Sched é focado em sequenciamento de curto, médio e longo prazo. Ele é utilizado para criar cronogramas detalhados e otimizados do projeto de mineração. Suas principais funcionalidades incluem:

- Sequenciamento visual e dinâmico.
- Gerenciamento de restrições.
- Integração com modelos geológicos.
- Análise de cenários.
- Geração de gráficos e relatórios.

Os principais tipos de dados e relatórios que ele entrega são: cronogramas da lavra (sequenciamento, duração das atividades, calendários operacionais); tonelagens e volumes; qualidade do minério; recursos e equipamentos; indicadores financeiros entre outros.

### **3.2.5 Equipamentos**

Para a realização deste estudo, foram selecionados arbitrariamente dois conjuntos de equipamentos, apenas para efeito de análise, com o objetivo de avaliar a variação na quantidade da frota em função das diferentes larguras dos painéis. O primeiro conjunto consiste em equipamentos de menor capacidade, sendo composto pela escavadeira CAT 336 (Figura 3-3) e pelo caminhão Scania G500 (Figura 3-4), com capacidade máxima de 40 toneladas.

**Figura 3-3: Escavadeira CAT 336**



Fonte: Caterpillar

**Figura 3-4: Caminhão Scania G500**



Fonte: Treviso

Já o segundo conjunto, de maior capacidade, é formado pela escavadeira CAT 395 (Figura 3-5) e pelo caminhão fora de estrada CAT 775 (Figura 3-6), cuja capacidade máxima é de 65 toneladas, permitindo uma maior produtividade e eficiência no transporte de material.

**Figura 3-5: Escavadeira CAT 395**



Fonte: Caterpillar

**Figura 3-6: Caminhão CAT 775**



Fonte: Caterpillar

## 4. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo visa analisar como as variações nas dimensões dos painéis afeta na produtividade, nos custos de CAPEX, despesas com aquisição de ativos, como máquinas, e OPEX, despesas operacionais, e conseqüentemente no fluxo de caixa em uma operação de mineração em terraços. Para isso será simulado três diferentes cenários no sequenciamento de lavra. Para cada cenário de lavra, será realizado também o dimensionamento da frota de equipamentos de mineração, como caminhões, escavadeiras e carregadeiras. Esse dimensionamento levará em consideração as características de cada cenário, como distância de transporte, tempos de ciclo e produtividade dos equipamentos.

Serão definidos três cenários, com diferentes larguras de painéis, escolhidas arbitrariamente para efeitos de estudo. O sequenciamento foi projetado de modo a atingir as movimentações previstas no plano de produção garantindo os rendimentos e qualidades orçadas. A produtividade será medida pela quantidade de material movimentado, enquanto os custos operacionais serão calculados considerando uma projeção detalhada dos custos de mina, processo, custos químicos e outros custos relevantes. O fluxo de caixa será projetado com base na receita de venda do material, descontando os custos operacionais projetados.

### 4.1 Simulações

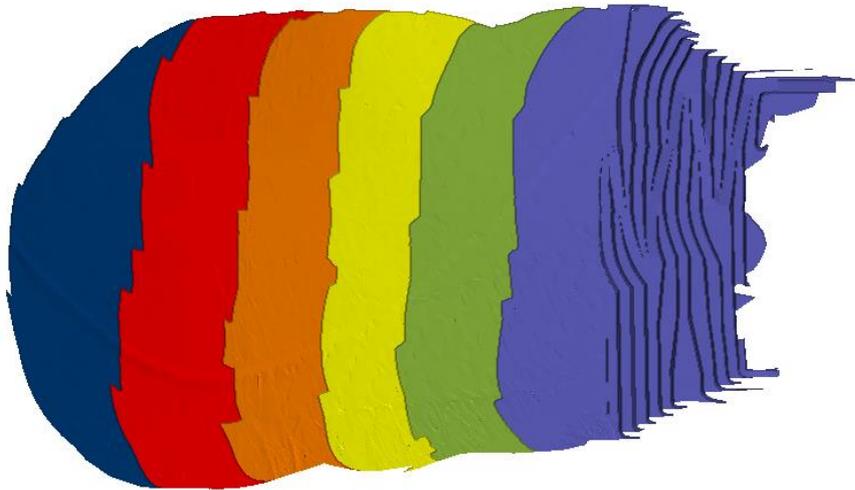
Os testes foram iniciados com a cubagem de três cenários, diferenciados pela largura dos painéis (*pushbacks*). No primeiro cenário, a largura dos painéis foi definida em 200 metros, resultando em um total de seis fases de lavra (figura 4-1). O segundo cenário apresentou painéis com 400 metros de largura, divididos em três fases (figura 4-2). Já o terceiro cenário considerou painéis com 600 metros de largura, correspondendo a duas fases de lavra (figura 4-3), na tabela 4-1 é possível visualizar um resumo dessas configurações. A partir das figuras, com vista em planta, é possível perceber visualmente as diferenças entre os cenários com destaque às variações na quantidade e geometria das fases. A sequência de extração dos painéis inicia da direita para a esquerda, mas devido a flexibilidade do método *terrace mining* a lavra pode ocorrer simultaneamente em mais de um painel ao mesmo tempo.

**Tabela 4-1: Configurações cenários**

Cenário	Largura dos painéis (m)	Nº de fases			
1	200	6			
2	400	3 </tr <tr><td>3</td><td>600</td><td>2</td></tr>	3	600	2
3	600	2			

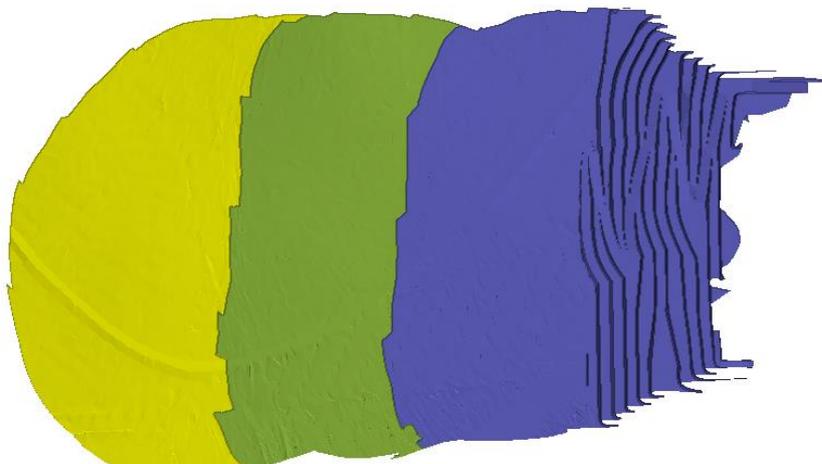
Fonte: Elaborado pela autora, 2025

**Figura 4-1: Fases primeiro cenário**



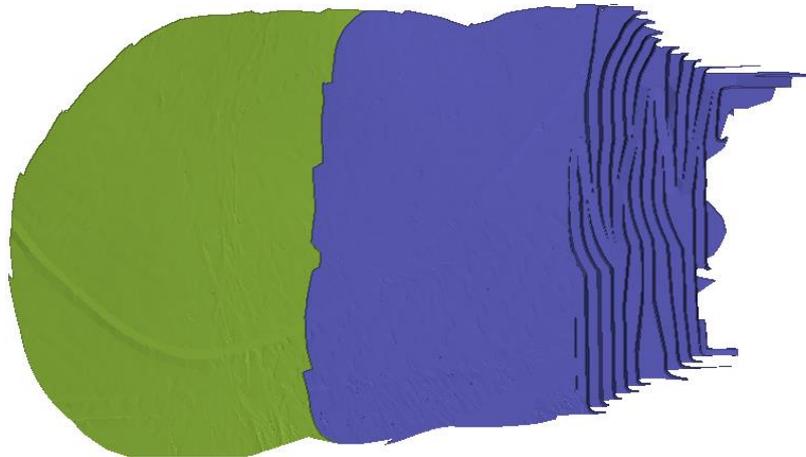
Fonte: Elaborado pela autora, 2025

**Figura 4-2: Fases segundo cenário**



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

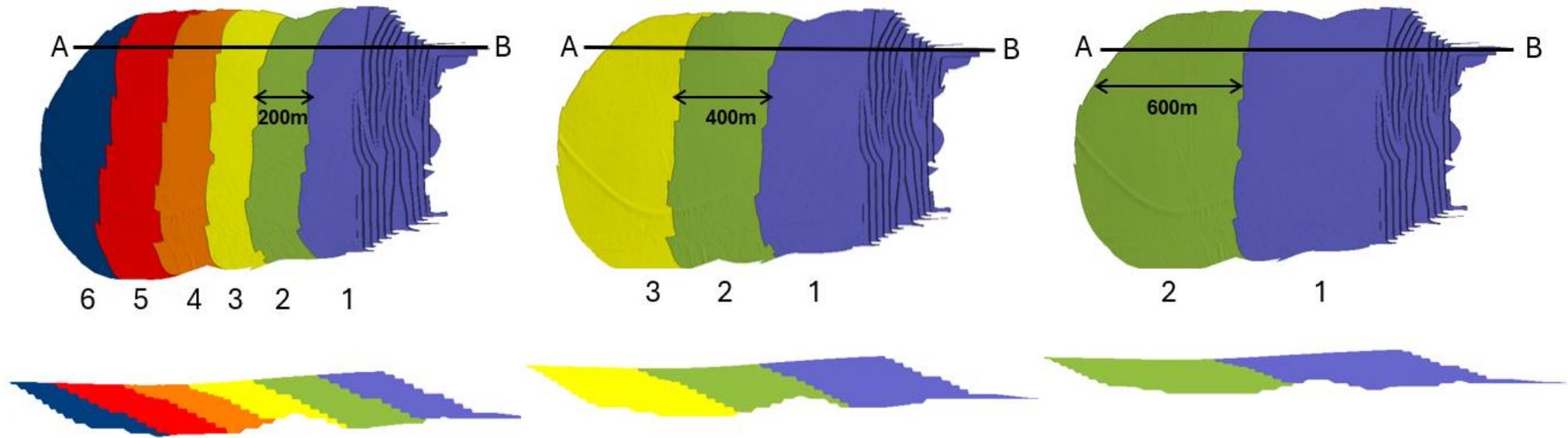
**Figura 4-3: Fases terceiro cenário**



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Em seguida, para facilitar a visualização e análise, cada cenário foi subdividido em seções após a separação em fases, conforme ilustrado na figura 4-4. Posteriormente, foi realizado o sequenciamento de lavra, com o Deswik.Sched para cada um dos cenários, permitindo uma avaliação detalhada do desenvolvimento de cada fase e suas respectivas seções.

Figura 4-4: Seções cenários



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Para o dimensionamento da frota utilizou-se uma planilha de Excel já programada para calcular a quantidade de equipamentos necessários para o plano de produção trabalhado. Para efeitos de estudo considerou-se as seguintes configurações:

- Um par de equipamentos de menor capacidade composto pela carregadeira CAT 336 e o caminhão Scania G500. Para sua capacidade considerou-se 40 toneladas.
- Um par de equipamentos de maior capacidade composto pela carregadeira CAT 395 e o caminhão fora de estrada CAT 775. Para sua capacidade considerou-se 65 toneladas.
- Os equipamentos foram considerados locados e não próprios, logo não foi necessário levar em conta a reposição dos equipamentos, uma vez que ela será responsabilidade do locador.
- A distância média de transporte (DMT) foi considerada a mesma para os três cenários.
- A velocidade considerada para os equipamentos foi de 24 Km/h.

Variáveis como tempo de fila, durabilidade dos pneus para os equipamentos de transporte, tempo ciclo da pá carregadeira e consumo de diesel, foram considerados os mesmos parâmetros dos três cenários simulados.

Definiu-se a disponibilidade física (DF), proporção do tempo total em que a máquina está disponível para uso, para cada equipamento. Considerou-se a DF de 85% para todos os equipamentos em todos os cenários.

Com todos os dados devidamente preenchidos o próximo passo é a definição da utilização física (UF) de cada equipamento. A UF de um equipamento na operação de mina representa a proporção de tempo em que a máquina está efetivamente disponível para operação em relação ao tempo total do período considerado. Esse indicador reflete a confiabilidade do equipamento e o impacto das manutenções programadas e corretivas.

Posteriormente, levando em consideração todos os dados inseridos e obtidos, a quantidade de equipamentos foi calculada a partir da macro existente na planilha. O processo foi repetido para cada ano de cada um dos cenários primeiramente levando em consideração os equipamentos de menor capacidade e em seguida os de maior

capacidade. Ao final do procedimento é gerado um relatório com os resultados de cada um dos testes.

## **5. RESULTADOS**

Os resultados obtidos com as análises dos três cenários de lavra para o método *terrace mining* em uma mina hipotética de fosfato são apresentados a seguir.

### **5.1 Cubagem**

Os principais aspectos técnicos e econômicos são demonstrados nas figuras 5-1 a 5-3 e tabelas 5-1 a 5-3.

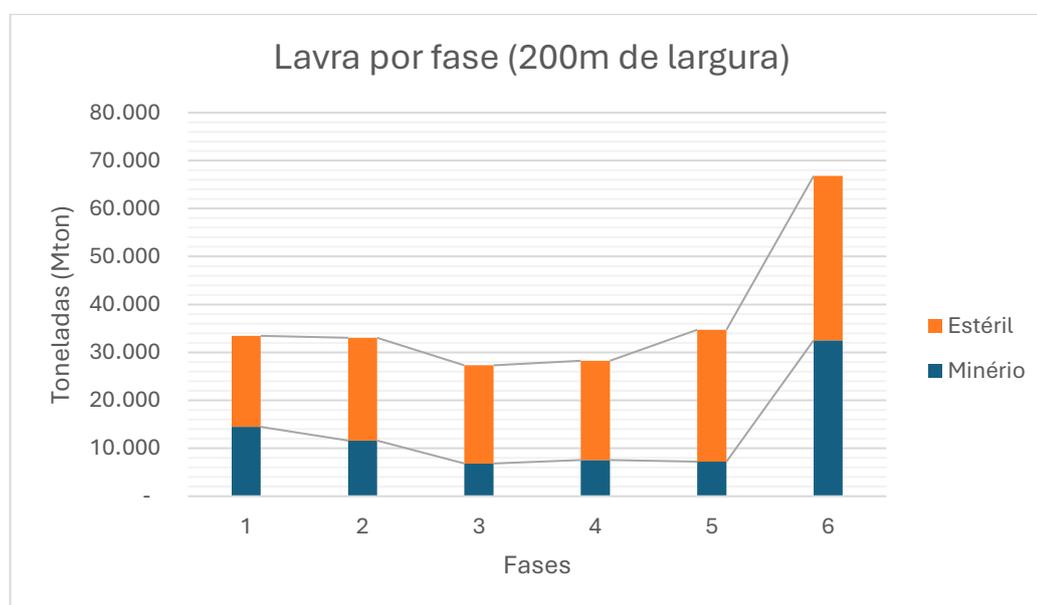
Para o cenário 1, com painéis de aproximadamente 200m de largura, observou-se que as fases apresentaram um teor médio de 11,27% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> apatítico, com uma variação de 10,02% a 12,10%. A Relação Estéril Minério (REM), que indica a quantidade de estéril a ser removida para cada unidade de minério extraído, variou entre 1,05 e 3,08. Houve um aumento significativo na REM durante o *pushback* da fase 5, devido a um maior volume de estéril a ser movimentado nessa fase. A última fase contribuiu com um volume maior de minério, na ordem de 32,270 milhões de toneladas e apresentou a menor REM, sendo 1.05, e maior teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ap, 12.10%

**Tabela 5-1: Cubagem cenário 1**

Fase	Tonelada Estéril (Mton)	Tonelada Minério (Mton)	REM (t/t)	P2O5ap (%)	Rendimento Mássico (%)
1	19,000	14,483	1.31	11.32	18.13
2	21,429	11,638	1.84	10.60	18.05
3	20,472	6,836	2.99	10.97	17.93
4	20,738	7,550	2.75	10.12	16.28
5	27,469	7,220	3.80	10.02	15.82
6	34,270	32,517	1.05	12.10	22.06
Total	143,379	80,243	1.79	11.27	35.88

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

**Figura 5-1: Gráfico movimentação por fase - Cenário 1**



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

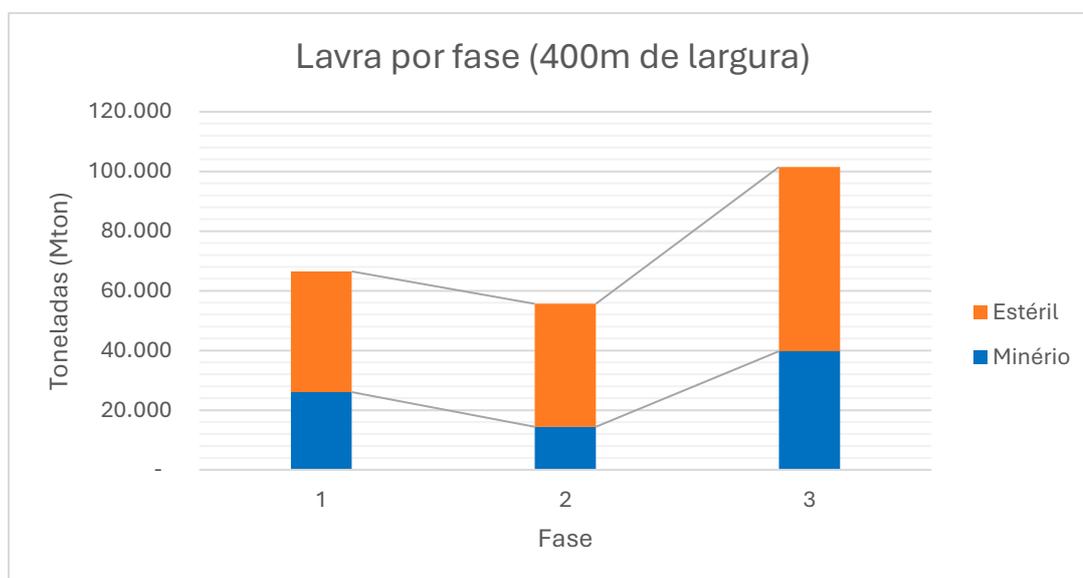
No segundo cenário, com painéis de 400m de largura, observou-se que as fases apresentaram um teor médio de 11,29% de P2O5 apatítico, com uma variação de 10,52% a 11,72%. A REM variou entre 1,55 e 2,86. A REM da primeira fase e da terceira foram as mesmas. A última fase contribuiu com um volume maior de minério, na ordem de 39,737 milhões de toneladas e maior teor de P2O5ap, 11,72%.

**Tabela 5-2: Cubagem cenário 2**

Fase	Tonelada Estéril (Mton)	Tonelada Minério (Mton)	REM (t/t)	P2O5ap (%)	Rendimento Mássico (%)
1	40,427	26,086	1.55	11.06	18.09
2	41,213	14,420	2.86	10.52	17.06
3	61,739	39,737	1.55	11.72	20.92
Total	143,379	80,243	1.79	11.29	35.88

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

**Figura 5-2: Gráfico movimentação por fase - Cenário 2**



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

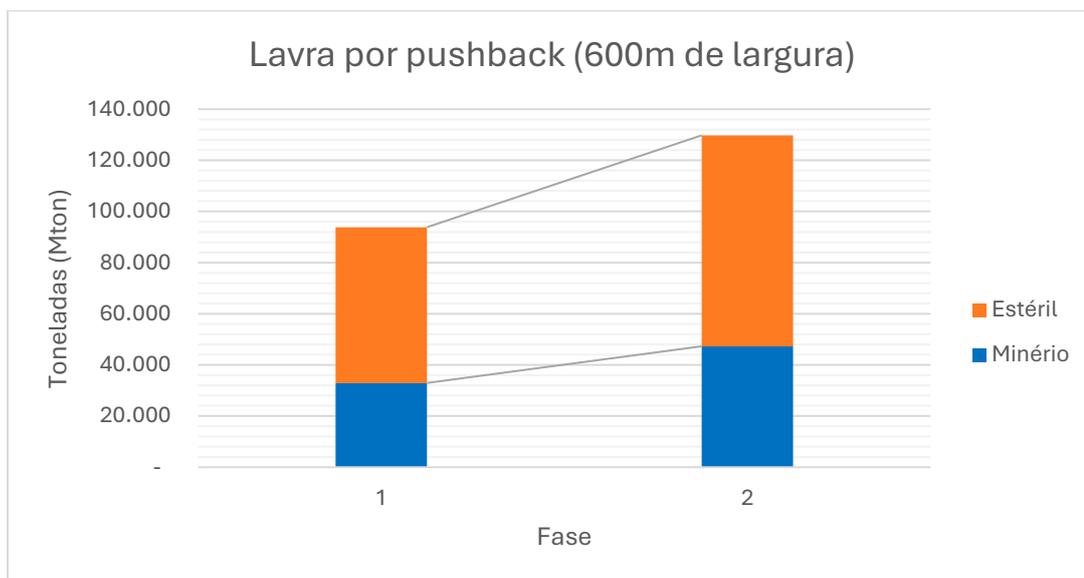
Por outro lado, para o cenário 3 com painéis de 600m de largura, trouxe desafios significativos devido ao aumento da movimentação de estéril. A REM variou de 1,74 a 1,85 e o teor médio foi da ordem de 11,28%. A última fase, fase dois, também apresentou o maior volume de minério que foi de 47,287 milhões de toneladas.

**Tabela 5-3: Cubagem cenário 3**

Fase	Tonelada Estéril (Mton)	Tonelada Minério (Mton)	REM (t/t)	P2O5ap (%)	Rendimento Mássico (%)
1	60,899	32,956	1.85	11.03	18.06
2	82,477	47,287	1.74	11.46	20.18
Total	143,376	80,243	1.79	11.28	35.88

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

**Figura 5-3: Gráfico movimentação por fase - Cenário 3**



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

## 5.2 Plano de movimentação

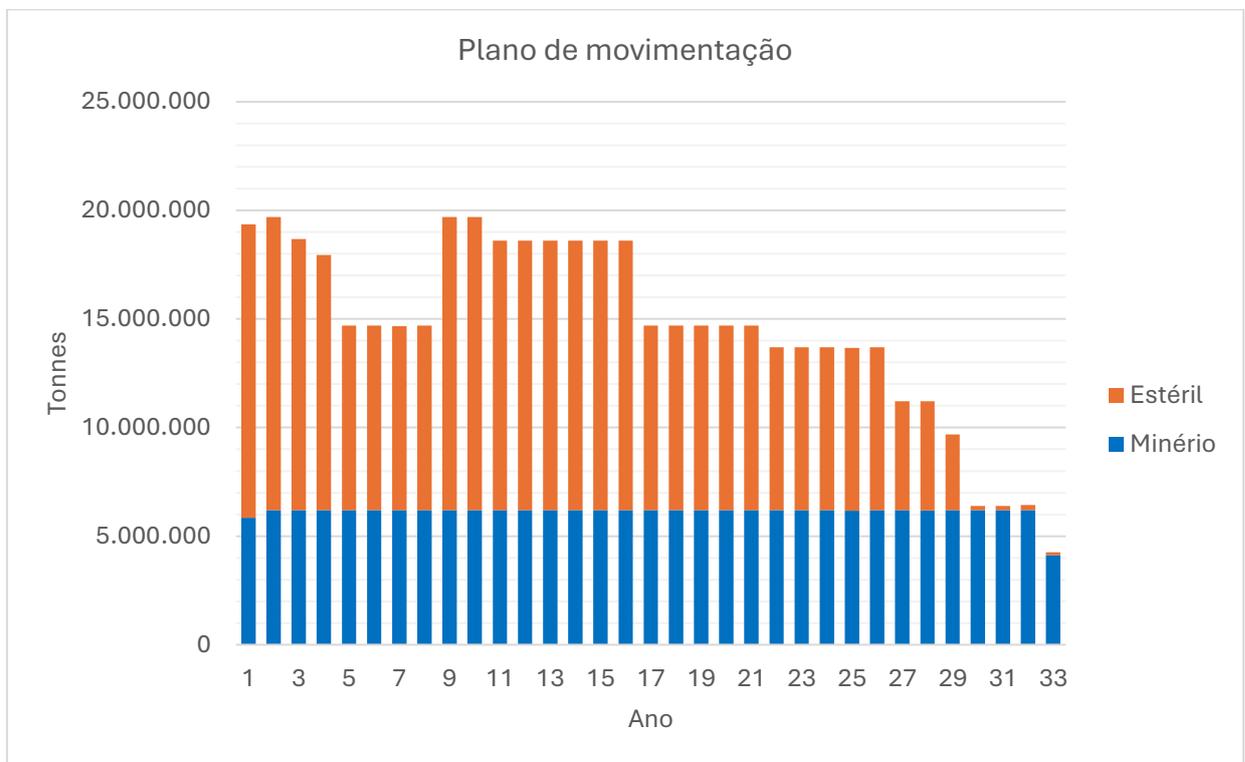
A análise dos gráficos de movimentação de estéril versus minério (Figuras 5-4 a 5-6) revela uma correlação entre a largura dos *pushbacks* e a eficiência operacional da mina. No cenário 3, em que foram adotados *pushbacks* com 600 m de largura, observou-se um aumento na Relação Estéril/Minério (REM) em determinados anos, indicando a necessidade de remover um volume maior de estéril para acessar o minério. Esse aumento pode ser atribuído à maior área de exposição do estéril nos *pushbacks* mais largos, o que exige uma remoção proporcionalmente maior de material para viabilizar a lavra do minério.

Em contraste, no cenário 1, que utilizou *pushbacks* mais estreitos, a movimentação de estéril foi reduzida sem comprometer a extração de minério. Esse efeito pode ser explicado pela maior seletividade na lavra, permitindo um acesso mais rápido ao minério devido à maior velocidade de avanço vertical.

A menor movimentação de estéril no cenário 1 proporciona diversos benefícios operacionais, incluindo a redução de custos com combustível e manutenção de equipamentos, menor tempo de lavra e menor necessidade de investimentos em frota (CAPEX). Além disso, *pushbacks* mais estreitos podem contribuir para a diminuição dos custos com disposição de estéril, reduzindo a necessidade de ampliação das

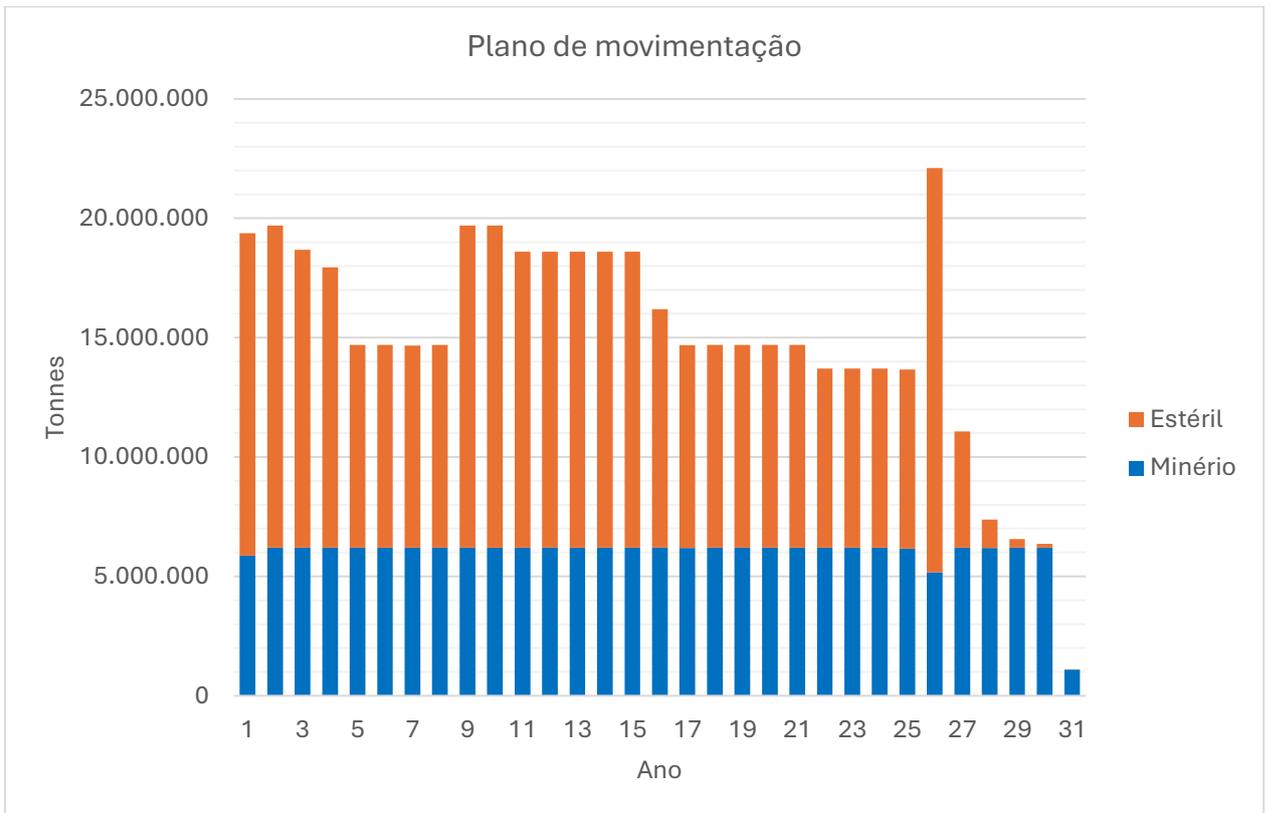
pilhas de estéril e otimizando o uso da área disponível. Também há impacto na eficiência energética, pois menores distâncias de transporte resultam em menor consumo de diesel e menor desgaste dos equipamentos. Outro fator relevante é a possível redução dos custos com infraestrutura associada, como estradas de acesso e drenagem, que podem ser dimensionadas de forma mais enxuta. Assim, os resultados demonstram que a largura dos *pushbacks* é um fator determinante na otimização da lavra, influenciando diretamente a eficiência operacional e os custos do empreendimento.

**Figura 5-4: Gráfico plano movimentação anual - Cenário 1**



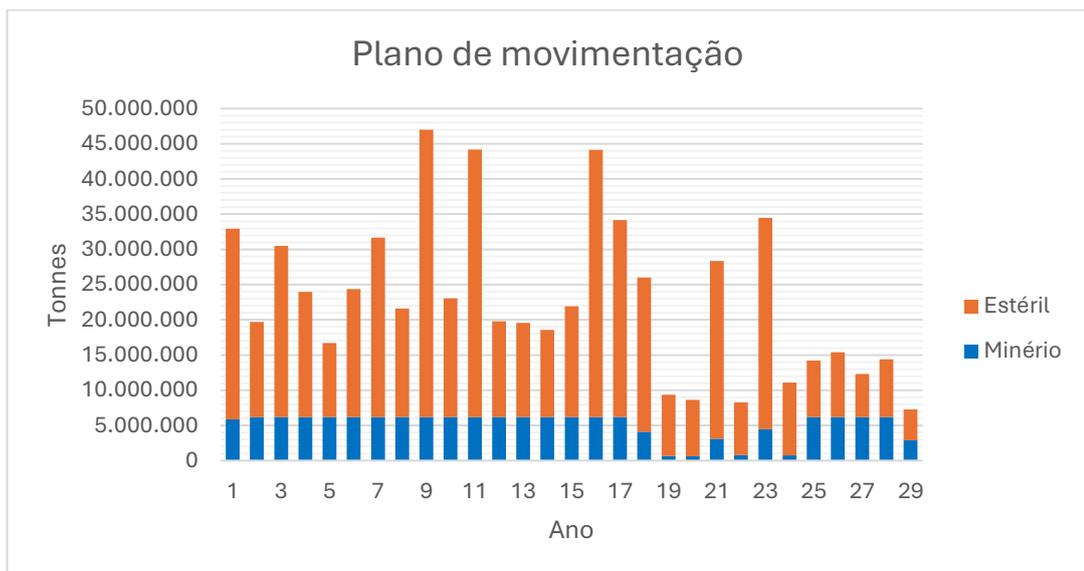
Fonte: Elaborado pela autora, 2025

**Figura 5-5: Gráfico plano movimentação anual - Cenário 2**



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

**Figura 5-6: Gráfico plano movimentação anual - Cenário 3**



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

### 5.3 Variação custo estéril fixo

A análise gráfica da variação do custo de estéril, figura 5-7, ao longo dos anos para cada cenário apresentou informações importantes sobre a influência da largura dos painéis nos custos operacionais da mina. Como a distância média de transporte foi mantida constante nos três cenários, a única variável que impacta diretamente no custo de estéril é a movimentação desse material, mostrada na figura 5-8.

Os resultados mostram que o cenário 3 apresenta picos de custos significativamente superiores aos cenários 1 e 2. Essa diferença é uma consequência direta da maior movimentação de estéril necessária no cenário 3. Devido às maiores dimensões dos painéis, o cenário 3 exige a movimentação de um volume consideravelmente maior de estéril para acessar a mesma quantidade de minério prevista para o ano. Esse aumento na movimentação de estéril se traduz em um aumento nos custos associados, como custos de remoção, transporte e disposição do material.

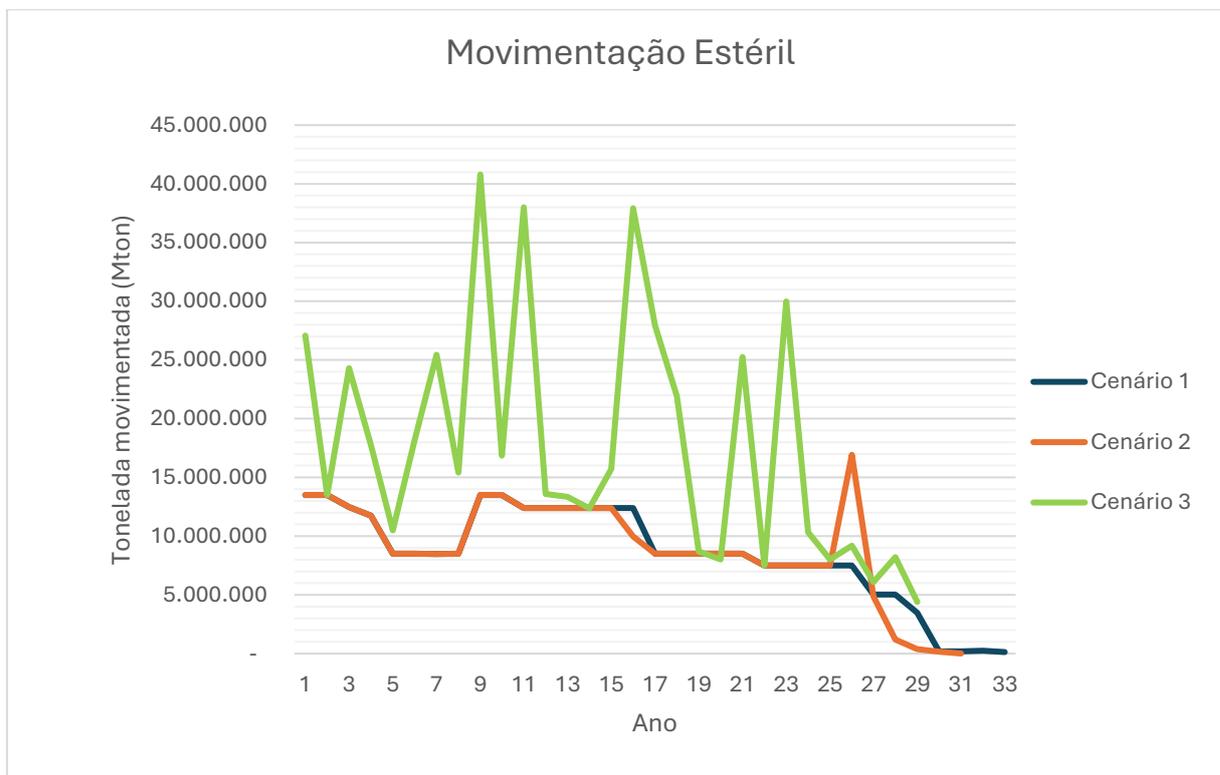
Em contraste, os cenários 1 e 2, com painéis menores, exigem uma movimentação de estéril proporcionalmente menor, resultando em custos de estéril mais baixos e estáveis ao longo dos anos.

Figura 5-7: Variação custo estéril fixo ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Figura 5-8: Movimentação Estéril



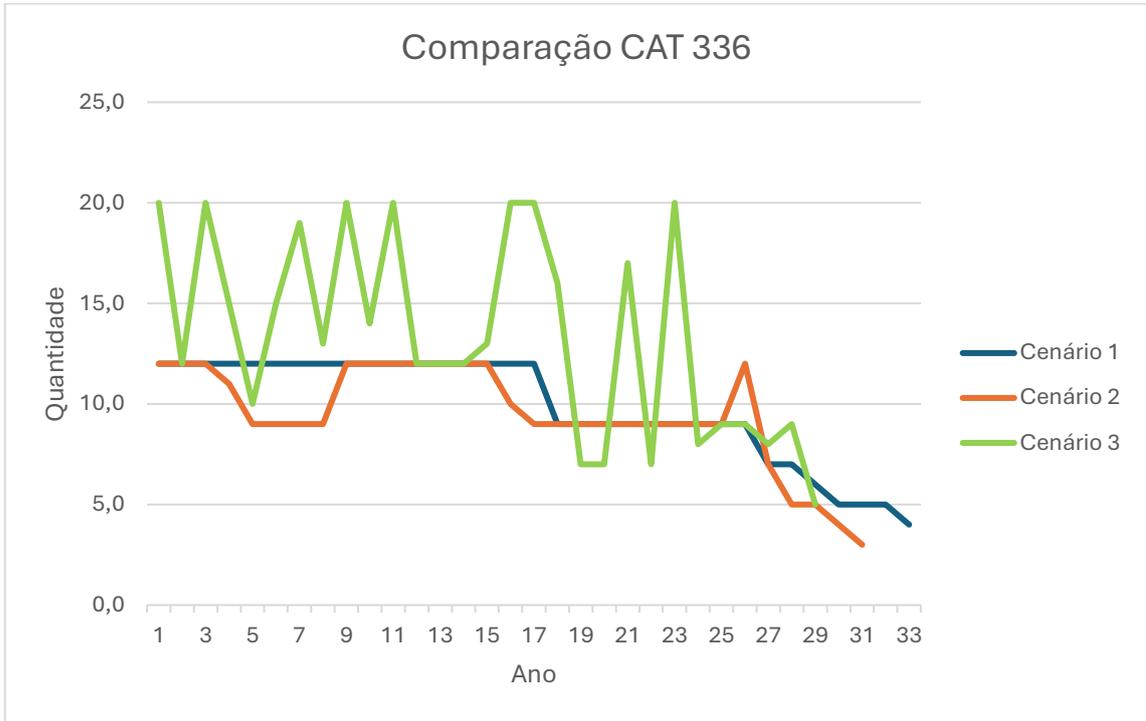
Fonte: Elaborado pela autora, 2025

#### 5.4 Frota carga

A análise dos cenários, ilustradas nas figuras 5-9 e 5-10, evidencia que a utilização da escavadeira CAT 395, de maior capacidade, reduz a quantidade necessária de equipamentos em comparação com a CAT 336, tornando-se a opção mais vantajosa nos três cenários.

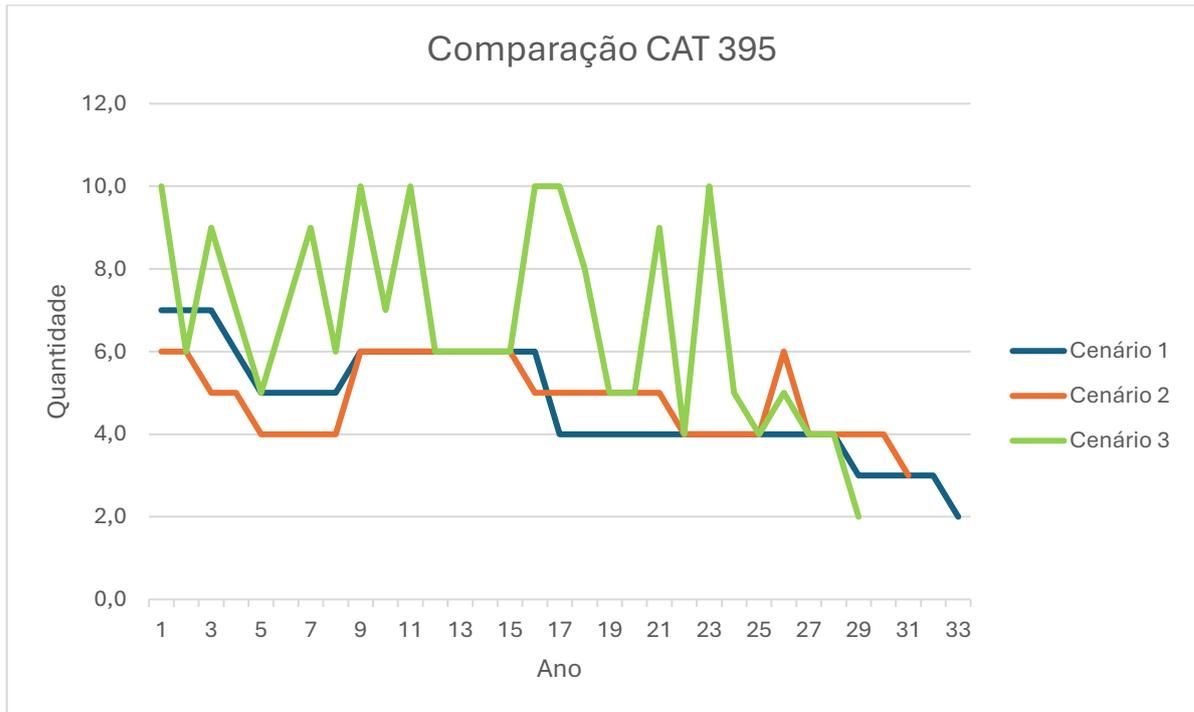
Além disso, observa-se que o cenário 2, de modo geral, requer uma quantidade menor de equipamentos em comparação ao cenário 1, apesar de em alguns anos ambos se igualarem. No ano 26, no entanto, o cenário 2 apresenta um leve aumento na demanda por equipamentos devido ao maior volume de estéril a ser movimentado. Já o cenário 3 exige a maior quantidade de equipamentos ao longo do tempo, devido às grandes variações no volume de movimentação de estéril, tornando sua operação mais instável e demandando maior alocação de recursos.

Figura 5-9: Comparação quantidade CAT 336



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Figura 5-10: Comparação quantidade CAT 395



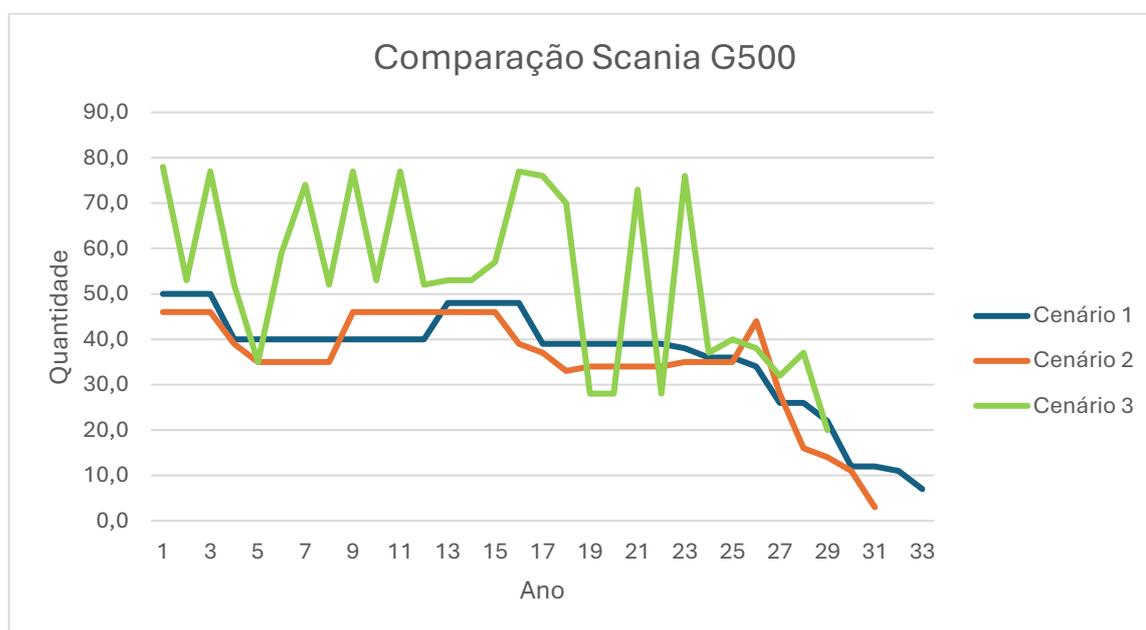
Fonte: Elaborado pela autora, 2025

## 5.5 Frota transporte

A análise dos cenários revela que, assim como nos equipamentos de carga, a utilização do caminhão CAT 775, de maior capacidade, reduz a necessidade de equipamentos em comparação com o Scania G500, oferecendo uma vantagem em termos de eficiência nos três cenários.

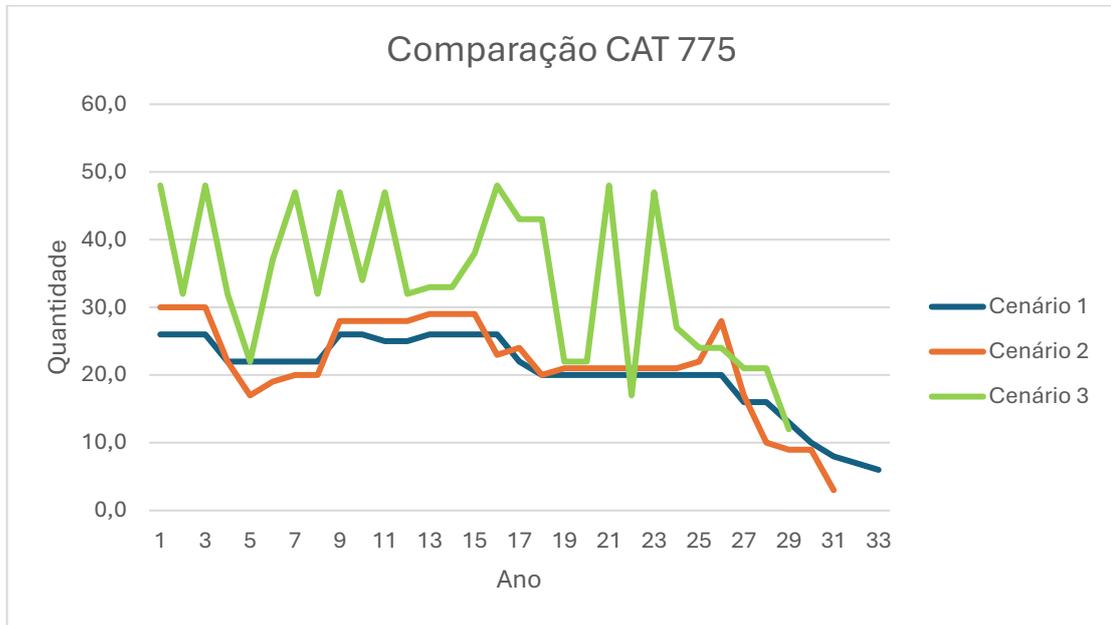
Assim como para a frota da carga, no ano 26, o cenário 2 apresenta um leve aumento na demanda por equipamentos devido ao maior volume de estéril a ser movimentado. No cenário do CAT 775, a frota do cenário 2 apresenta-se ligeiramente maior que a do cenário 1, ao longo dos anos, porém, se comparado ao cenário do Scania G500, ainda sim requer uma quantidade menor de equipamentos. Por outro lado, o cenário 3 continua a exigir a maior quantidade de equipamentos de transporte ao longo do tempo, devido às grandes variações no volume de movimentação de estéril, o que resulta em uma operação mais instável e demanda maior alocação de recursos.

Figura 5-11: Comparação quantidade Scania G500



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Figura 5-12: Comparação quantidade CAT 775



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

## 6. DISCUSSÃO

A análise dos cenários de lavra revelou que a largura dos painéis influencia diretamente a movimentação de estéril, impactando os custos operacionais (OPEX) e de capital (CAPEX) do projeto. O cenário 3, com painéis de maiores dimensões, apresenta uma movimentação de estéril significativamente maior em comparação com os cenários 1 e 2. Essa maior movimentação de estéril no cenário 3 é uma consequência direta da necessidade de remover um volume maior de estéril para acessar a mesma quantidade de minério prevista no plano de lavra. As maiores dimensões dos painéis exigem a abertura de áreas maiores, o que resulta em um volume proporcionalmente maior de estéril a ser movimentado.

Essa movimentação adicional de estéril impacta diretamente os custos do projeto. No que diz respeito aos custos operacionais (OPEX), a maior movimentação de estéril implica em maiores gastos com combustível, manutenção de equipamentos, mão de obra e outros insumos. Além disso, a necessidade de movimentar um volume maior de estéril pode exigir um maior número de equipamentos, o que eleva os custos de

capital (CAPEX) do projeto. Essa análise demonstra de forma clara como a largura dos painéis influencia a movimentação de estéril e, conseqüentemente, os custos operacionais e de capital do projeto. O cenário 3, com a maior movimentação de estéril, apresenta custos mais elevados em comparação com os cenários 1 e 2, evidenciando a importância de otimizar as dimensões dos painéis para minimizar os custos e garantir a viabilidade econômica do projeto.

A análise dos gráficos de movimentação de estéril versus minério revelou que a largura dos *pushbacks* também influencia diretamente a eficiência operacional e a viabilidade econômica da mina. Nesse contexto, é fundamental ressaltar que o cenário 3, com *pushbacks* de 600 m, não representa apenas um desafio operacional, mas também uma estratégia inviável do ponto de vista do planejamento de longo prazo. A necessidade de movimentações abruptas de estéril em determinados anos, para acesso ao minério, acarreta uma série de conseqüências negativas.

Em primeiro lugar, a movimentação excessiva de estéril eleva consideravelmente os custos operacionais da mina, incluindo gastos com combustível, manutenção de equipamentos, mão de obra e outros insumos. Além disso, tais movimentações podem gerar atrasos no cronograma de produção, comprometendo o cumprimento das metas estabelecidas.

Ademais, o cenário 3 apresenta um risco significativo de não atingir a movimentação de minério planejada em alguns anos. Essa falha na produção resulta em perdas de receita e compromete a rentabilidade da mina, impactando negativamente o fluxo de caixa do projeto. Em contraste, os cenários 1 e 2, com *pushbacks* mais estreitos, possibilitam uma movimentação de estéril mais equilibrada ao longo dos anos. Essa abordagem melhora a previsibilidade da produção, reduz impactos financeiros e operacionais e contribui para a otimização dos recursos disponíveis.

Portanto, a análise detalhada dos cenários revela que o cenário 2 se destaca por oferecer um bom equilíbrio entre a movimentação de estéril e os custos operacionais, ao mesmo tempo em que mantém a previsibilidade financeira. Já o cenário 3, com suas grandes variações na movimentação de estéril, tende a gerar custos mais altos e comprometer a estabilidade financeira da mina, tornando-se uma opção menos viável para projetos com menor capacidade de suportar essas flutuações.

Na análise realizada, é importante observar que a massa total de minério prevista no plano de lavra pode apresentar discrepâncias em relação à soma total obtida nos *pushbacks*, devido à limitação da análise dos painéis. Esta análise foi realizada apenas em uma porção da cava.

Em resumo, a largura dos painéis e o planejamento da movimentação de estéril devem ser cuidadosamente considerados para otimizar a operação e reduzir os custos, garantindo a viabilidade econômica e a estabilidade do projeto a longo prazo.

## 7. CONCLUSÃO

Com base na análise realizada sobre os diferentes cenários de painéis no método de lavra *terrace mining*, o trabalho permite concluir os seguintes pontos principais:

A largura dos painéis impacta diretamente a produtividade, os custos operacionais e a razão estéril/minério (REM). *Pushbacks* mais estreitos (200m) oferecem um controle operacional mais eficiente, com menor variação na movimentação de estéril, resultando em menor impacto nos custos operacionais (OPEX) e de capital (CAPEX). Por outro lado, *pushbacks* mais largos (600m), como observados no cenário 3, exigem uma maior movimentação de estéril, o que implica em custos mais elevados e um risco financeiro mais significativo, devido à instabilidade no fluxo de caixa e à imprevisibilidade nos gastos com a operação.

Pode-se sugerir que o cenário 1 (200m) é mais adequado para estágios iniciais ou depósitos com incertezas geológicas, proporcionando maior flexibilidade e controle sobre a movimentação de estéril, mas com menor aproveitamento da capacidade de equipamentos. O cenário 2 (400m) é o mais equilibrado, oferecendo boa produtividade, controle de custos e otimização dos equipamentos, além de manter a relação estéril/minério dentro de valores aceitáveis. O cenário 3 (600m) apresenta movimentação excessiva de estéril, elevando custos operacionais e riscos financeiros, o que o torna menos viável, especialmente para projetos de longo prazo.

A análise da frota de equipamentos também revela a influência direta da largura dos painéis. Cenários com *pushbacks* mais largos (como o cenário 3) exigem uma frota maior para atender à movimentação de estéril aumentada, o que eleva os custos de

capital (CAPEX) e pode sobrecarregar a operação, exigindo maior manutenção e maior consumo de combustível. Já cenários com *pushbacks* mais estreitos (como o cenário 1 e 2) utilizam uma frota mais equilibrada, permitindo otimizar o uso dos equipamentos e reduzir os custos operacionais. Isso destaca a importância de ajustar o número e tipo de equipamentos à configuração do projeto, garantindo que a frota seja dimensionada adequadamente para maximizar a eficiência e controlar os custos.

O método *terrace mining* demonstrou ser uma solução viável para depósitos de fosfato, desde que as configurações de largura dos painéis sejam cuidadosamente selecionadas, levando em consideração tanto os aspectos operacionais quanto os econômicos e geológicos.

A escolha ideal de configuração depende diretamente das condições geológicas do depósito, do estágio do projeto e da capacidade de investimento disponível. Cenários como o 2 oferecem a melhor combinação de viabilidade técnica e econômica, enquanto cenários com painéis mais largos, como o 3, devem ser evitados para evitar custos excessivos e riscos financeiros.

Este estudo reforça a importância de integrar análises técnicas, econômicas e estratégicas no planejamento de lavra, com o objetivo de maximizar a eficiência, reduzir os custos e minimizar os riscos operacionais e financeiros.

Além das conclusões sobre os impactos da largura dos painéis, o trabalho sugere que investigações futuras explorem o impacto ambiental das diferentes configurações, examinem depósitos com geometrias mais complexas e considerem o uso de tecnologias avançadas, como simulações geológicas mais detalhadas, para otimizar o planejamento de lavra e aumentar a precisão das projeções de custo e produção.

## REFERÊNCIAS

Araya, A.S. & Nehring, M. & Vega, E.T. & Saavedra Miranda, N.. (2020). The impact of equipment productivity and pushback width on the mine planning process. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 120. 599-607. 10.17159/2411-9717/1256/2020.

BASTOS, Flávia de Freitas. Aplicação da terrace mining como alternativa para lavra de gipsita na região do Araripe – Pernambuco. Curso de Engenharia de Minas, Pós-Graduação em Engenharia Mineral PPGEMinas - UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Repositório UFPE, 2013.

BRASIL, A. T. Scania G 500 8x4 é o novo chefe da mina - Agência Transporta Brasil. Disponível em: <<https://www.transportabrasil.com.br/2019/04/scania-g-500-8x4-caminhao-heavy-tipper/>>.

CARTER, A. C. Terrace mining operations in stratified deposits. Mining Engineering Journal, v. 40, n. 3, p. 45-52, 1980.

CONSUEGRA, F. R. A.; DIMITRAKOPOULOS, R. Algorithmic approach to pushback design based on stochastic programming: method, application and comparisons. Mining Technology, v. 119, n. 2, p. 88–101, jun. 2010.

CURI, A. Mineração: Princípios e Métodos. Editora Exemplo, 2017.

Deswik.CAD - Design and Solids Modeling for mining. Disponível em: <<https://www.deswik.com/product-detail/deswik-cad/>>.

Deswik.Sched (Gantt chart scheduling for mining). Disponível em: <<https://www.deswik.com/product-detail/deswik-scheduler/>>.

Escavadeira Hidráulica Cat® 336 | Cat | Caterpillar. Disponível em: <[https://www.cat.com/pt\\_BR/products/new/equipment/excavators/large-excavators/127122.html](https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/excavators/large-excavators/127122.html)>.

Escavadeira Hidráulica Cat® 395 | Cat | Caterpillar. Disponível em: <[https://www.cat.com/pt\\_BR/products/new/equipment/excavators/large-excavators/127102.html](https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/excavators/large-excavators/127102.html)>.

FLÁVIO, A. Sequenciamento direto de blocos em modelos estocásticos com multiminas e multidestinos. Ufmg.br, 2018.

GEOSCAN, P. Lavra na mineração: Entenda o que é e seus métodos. Geoscan, 26 nov. 2020. Disponível em: <https://www.geoscan.com.br/lavra-na-mineracao/>. Acesso em: 6 set. 2024.

HARTMAN, H. L. Introductory Mining Engineering. John Wiley & Sons, 1987.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Relatório Anual de Mineração. 2023. Disponível em: [www.ibram.org.br](http://www.ibram.org.br).

Interactive Scheduling - Deswik. Disponível em: <https://www.deswik.com/product-detail/interactive-scheduler-module/>.

JOHNSON, R.; SMITH, L.; BROWN, K. Terrace mining in the Andes: An evaluation of efficiency and environmental impact. Journal of Mining Engineering, 2021.

JUNIOR, C. M. B. Planejamento de lavra preliminar para uma ocorrência de ouro no estado de Nevada, EUA. Disponível em: [https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Cassio\\_Murilo\\_Borges.pdf](https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Cassio_Murilo_Borges.pdf).

MEAGHER, C.; ROUSSOS DIMITRAKOPOULOS; AVIS, D. Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem—a review. v. 50, n. 3, p. 508–526, 4 dez. 2014.

MITRA, R.; SERKAN SAYDAM. Surface Coal Mining Methods in Australia. InTech eBooks, 9 mar. 2012.

NANCEL-PENARD, P.; MORALES, N. Optimizing pushback design considering minimum mining width for open pit strategic planning. Engineering Optimization, p. 1–15, 28 jun. 2021.

ROCHA, S. S. Análise comparativa dos benefícios econômicos, operacionais e ambientais do método Terrace Mining na mineração de gipsita do polo gesseiro do Araripe. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/26893>.

SMITH, A. Bench mining in Chilean copper mines: A case study. International Journal of Mineral Resources, 2020.

Terrace Mining. Disponível em:

<[https://ebrary.net/183812/environment/terrace\\_mining](https://ebrary.net/183812/environment/terrace_mining)>.

775 (07) Caminhões Fora-de-estrada | Cat | Caterpillar. Disponível em:

<[https://www.cat.com/pt\\_BR/products/new/equipment/off-highway-trucks/off-highway-trucks/122021.html](https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/off-highway-trucks/off-highway-trucks/122021.html)>.