UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Departamento de Engenharia de Minas

Pós-Graduação em Engenharia de Minas - Mestrado Profissional

Newton Flávio Dos Santos Oliveira

ESTRATÉGIAS EFICAZES PARA OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA EM JURUTI: Análise de carregamento e transporte de minério e remoção de estéril

BELO HORIZONTE

2023

Newton Flávio Dos Santos Oliveira

ESTRATÉGIAS EFICAZES PARA OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA EM JURUTI: análise de carregamento e transporte de minério e remoção de estéril

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas da Univesidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Alizeibek Saleimen Nader

BELO HORIZONTE/MG
2023

Oliveira, Newton Flávio dos Santos.
O48e Estratégias eficazes para otimização da operação de mineração de bauxita em Juruti [recurso eletrônico] : análise de carregamento e transporte de minério e remoção de estéril / Newton Flávio dos Santos Oliveira. – 2023.
1 recurso online (80 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Alizeibeck Saleimen Nader.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Bauxita - Teses. 4. Lavra de minas - Teses. 5. Minas e mineração - Teses. 6. Transportes - Custo operacional - Teses. 7. Sustentabilidade - Teses. I. Nader, Alizeibeck Saleimen. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Roseli Alves de Oliveira CRB/6 2121
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

:

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

UFMG

ESTRATÉGIAS EFICAZES PARA OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA EM JURUTI: ANÁLISE DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE DE MINÉRIO E REMOÇÃO DE ESTÉRIL

NEWTON FLÁVIO DOS SANTOS OLIVEIRA

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 20 de outubro de 2023 pela seguinte banca:

Prof. Dr. Alizeibek Saleimen Nader (UFMG)
Orientador

gov.br Documento assinado digitalmente
ROBERTO GALERY
Data: 03/11/2023 19:29:09-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Roberto Galery (UFMG)

Pedro Casagrande

Prof. Dr. Pedro Benedito Casagrande (UFMG)

Dedico este trabalha ao meus pais Aeli e Newton, as minhas irmãs Aline e Ana Flávia, e ao meu companheiro Glayson Cardoso, com amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todos que me deram apoio e estímulo durante a realização deste trabalho. Em especial, agradeço ao Centro de Excelência em Mineração da Alcoa por proporcionar a oportunidade de desenvolver este estudo, apoiando e incentivando cada etapa do processo.

Também gostaria de agradecer ao professor Dr. Beck Nader pelo tempo e atenção dedicados à minha orientação, sempre fornecendo orientações precisas e sugestões valiosas para o avanço e aprimoramento do meu trabalho.

Agradeço especialmente ao meu companheiro, Glayson Cardoso, por sua compreensão nos momentos em que precisei me dedicar ao trabalho e por caminhar ao meu lado nos momentos mais desafiadores, sempre me incentivando.

Além disso, gostaria de agradecer ao consultor David Tutton por realizar a revisão técnica deste trabalho e ajudar a enriquecer meu estudo.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão à minha família, especialmente aos meus pais, Aeli e Newton, e minhas irmãs Aline e Ana Flávia, por seu constante apoio, incentivo e torcida.

RESUMO

Este trabalho apresentou alternativas viáveis e eficazes para a operação de lavra da mina de bauxita em Juruti, que visam torná-la mais eficiente e sustentável. A pesquisa explorou os desafios enfrentados pela operação de lavra de bauxita em Juruti e propôs metodologias para o carregamento e transporte de minério e remoção de estéril, com o objetivo de reduzir significativamente os custos operacionais. Os resultados obtidos mostraram uma redução de 65% nos custos operacionais, principalmente na remoção de estéril, com ganhos financeiros e ambientais importantes para a mineração. Além disso, este estudo fornece uma base sólida para futuras discussões e desenvolvimentos de metodologias de lavra para depósitos tabulares de bauxita na Amazônia. Espera-se que os resultados contribuam para o avanço da mineração sustentável na região, promovendo uma maior eficiência econômica e ambiental na atividade mineradora.

Palavras-chave: bauxita; lavra em tiras; Metodologia de Lavra

ABSTRACT

This dissertation explores the challenges faced by the bauxite mining operation in Juruti, which has been experiencing cost increases due to changes in the physical characteristics of the mine. The study aims to seek viable alternatives to make the mining operation in Juruti more efficient and sustainable. The study proposes methodologies for loading and transporting ore and removing waste rock, with fleet sizing and cost modeling performed to compare them with the current operation. The results demonstrate that the proposed methodologies significantly reduce mining costs in Juruti, with a potential 65% reduction in operational costs. The study finds that there is a greater potential for cost reduction in removing waste rock, with gains 150% larger than those of ore loading and transport. The results suggest that the proposed alternatives present a feasible and effective solution to improve the economic and environmental performance of mining in Juruti. Moreover, the results provide a solid foundation for future discussions and developments of mining methodologies for tabular bauxite deposits in the Amazon. The study concludes that the proposed methodologies can contribute to the advancement of sustainable mining in the region, promoting greater economic and environmental efficiency in mining activities.

Keywords: Bauxite; Strip mining; Mine Method

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Figura representativa das etapas da lavra em tiras 21
Figura 2 - Foto da etapa de carregamento em lavra de bauxita. 27
Figura 3 - Escavadeira de mineração R9250. 28
Figura 4 - Relação de compatibilidade entre caminhões fora de estrada e escavadeiras hidráulicas 29
Figura 5 - Foto de caminhão rodoviário em operação de mineração. 30
Figura 6 - Imagem de caminhão fora de estrada CAT 772G. 30
Figura 7 - Foto de trator de esteira CAT D6. 32
Figura 8 - Foto de trator de rodas CAT 834K. 33
Figura 9 - Escarificadores em trator de esteira. 34
Figura 10 - Motoscraper recebendo pushing. 35
Figura 11 - Sistema Scraper John Deere. 36
Figura 12 - Imagem esquemática do método de operação do sistema scraper John Deere. 36
Figura 13 - Figura esquemática de dragline para remoção de estéril em lavra de superfície. 37
Figura 14 - Mapa do estado do Pará, com o município de Juruti em destaque. 39
Figura 15 - Esquema representativo da operação de remoção de estéril em lavra em tiras com trator de esteiras CAT-D11. 40
Figura 16 - Trator CAT D11 com implemento single shank. 44
Figura 17 - Esquema representativo da caçamba modificada desenvolvida para este estudo. 45
Figura 18 - Foto do caminhão rodoviário com capacidade de transporte de 55t. 46
Figura 19 - Foto do Semirreboque com capacidade de transporte de 72t. 47
Figura 20 - Figura esquemática da comparação dos métodos de carregamento do minério: Escavadeira Hidráulica vs. Minerador de Superfície. 48
Figura 21 - Foto do minerador de superfície em operação. 48
Figura 22 - Tamanhos médios anuais das frotas de cada cenário estudado para a escarificação, carregamento e transporte de minério. 49

Figura 23 - Tamanho das equipes operacionais por frota de cada cenário estudado para escarificação, carregamento e transporte do minério. 49
Figura 24 - Foto da remoção de estéril em lavra de Bauxita com tratores CAT-D11..... 50
Figura 25 – Tamanhos médios anuais das frotas para o caso base de remoção do estéril. 51
Figura 26 - Tecnologias para operação remota dos tratores CAT-D11..... 52
Figura 27 - Esquema representativo das variáveis geométricas na operação de remoção de estéril pelo método de pushing com o trator CAT-D11..... 52
Figura 28 – Premissas de produtividade utilizadas para cada tecnologia para operação dos tratores e as geometrias consideradas para seu cálculo. 53
Figura 29 - Tamanhos médios anuais das frotas para os cenários de operação remota dos tratores D11. 53
Figura 30 - Tamanhos médios anuais das frotas comparando o caso base, operator station e rebaixo com sistema scraper. 54
Figura 31 - Distribuição da argila por atividade em operação de pushing com d11 em diferentes alturas operacionais 55
Figura 32 - Relação entre Altura operacional do D11, Produtividade e Custo Específico por Operação Unitária para Remoção de Estéril..... 56
Figura 33 - Tamanhos médios anuais das frotas para os cenários analisando o impacto da variação da altura operacional do D11..... 57
Figura 34 - Esquema representativo das etapas para remoção de estéril utilizando de escavadeira de grande porte. 58
Figura 35 - Tamanhos médios anuais das frotas comparando o caso base, o melhor cenário obtido na análise de altura operacional do D11 e o cenário considerando a aplicação de escavadeira de grande porte. 59
Figura 36 - Esquema representativo das varíaveis geométricas na operação da dragline, e os valores adotados neste estudo. 60
Figura 37 - Tamanhos médios anuais das frotas comparando o caso base, a aplicação de escavadeira de grande porte e cenário utilizando dragline. 60
Figura 38 – Fluxograma das análises propostas e resultados obtidos para carregamento e transporte de minério. 63
Figura 39 – Fluxograma das análises propostas e resultados obtidos para remoção do estéril. 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros que afetam a eficiência do minerador de superfície na operação de corte. 31

Tabela 2 - Comparação entre trator de rodas e trator de esteira. 33

Tabela 3 - Resultados financeiros para os cenários avaliados para a escarificação, carregamento e transporte de minério. 64

Tabela 4 - Resultados financeiros para a Análise de Operação Remota dos Tratores D11 67

Tabela 5 - Resultados financeiros para a análise de tecnologia para rebaixo (EH+Caminhão vs. Scraper) 68

Tabela 6 - Resultados financeiros para a análise da altura operacional do D11. 68

Tabela 7 - Resultados financeiros e comparação do caso base, o melhor cenário obtido na análise de altura operacional do D11 e o cenário considerando a aplicação de escavadeira de grande porte. 69

Tabela 8 - Comparação financeira dos diferentes cenários para operação de remoção do estéril. 70

Tabela 9 - Resultados de Custos e Ganho Relativo das Alternativas Propostas para a Operação de Lavra da Mina de Bauxita em Juruti 71

ABREVIATURAS E SIGLAS

CapEx	Gastos de Capital
DMT	Distância média de transporte
E0	Caso base para remoção de estéril
E1	Cenário considerando a tecnologia *Remote Console* na operação do D11 no estéril
E2	Cenário considerando a tecnologia *Operator Station* na operação do D11 no estéril
E3	Cenário considerando Scraper System para operação de rebaixo do estéril acima de 12m, e Operator Station no D11
E4	Cenário considerando Scraper System para operação de rebaixo do estéril acima de 6m, e Operator Station no D11
E5	Cenário considerando Scraper System para operação de rebaixo do estéril acima de 8m, e Operator Station no D11
E6	Cenário considerando Scraper System para operação de rebaixo do estéril acima de 10m, e Operator Station no D11
E7	Cenário considerando Scraper System para operação de rebaixo do estéril acima de 14m, e Operator Station no D11
E8	Cenário considerando Scraper System para operação de rebaixo do estéril acima de 16m, e Operator Station no D11
E9	Cenário considerando escavadeira de grande porte para remoção do estéril, junto com operator station no D11 e o Conjunto Escavadeira Hidráulica e Caminhão para rebaixo
E10	Cenário considerando e Dragline e o Conjunto Escavadeira Hidráulica e Caminhão para rebaixo, na remoção do estéril
EH+Caminhão	Conjunto Escavadeira Hidráulica Cat 374 e Caminhão para remoção de estéril
OpEx	Gastos Operacionais
M0	Caso base para carregamento e transporte de Minério
M1	Cenário avaliando a Escavadeira com caçamba modificada
M2	Cenário avaliando o Caminhão com 55t de capacidade
M3	Cenário avaliando o Cenário com 72t de capacidade
M4	Cenário avaliando o Minerador de Superfície
PO	Pesquisa Operacional
ROM	Run of Mine
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Fator de empolamento
γ_c	Peso específico do material no corte
γ_s	Peso específico do material empolado
DF	Disponibilidade física que representa a percentagem do tempo que o equipamento fica à disposição do órgão operacional para a produção
e	Empolamento
HM	Horas de Manutenção
HT	Total de horas efetivamente trabalhadas
HTP	Horas totais produtivas
N_{equip}	Número de equipamentos na frota (#)
P	Produção da frota
P_{anual}	Produção anual
$Prod_{ef}$	Produtividade efetiva
UT	Parcela em que o equipamento está em operação
V_{cr}	volume “in situ”
V_s	volume do material rochoso após a fragmentação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15

2. OBJETIVO 17

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

3.1 Caracterização da Bauxita 18

3.2 Projeto de Mineração e o Planejamento de Lavra 19

3.2.1 Método de Lavra 19

3.2.2 Lavra em tiras 20

3.3 Dimensionamento e Seleção de Frota 22

3.3.1 Dimensionamento de Frota por Indicadores de Produção 22

3.3.2 Simulação Computacional e Otimização 25

3.4 Máquinas e Equipamentos de Lavra 26

3.4.1 Carga – Escavadeira Hidraúlica 26

3.4.2 Transporte 28

3.4.3 Minerador de Superfície 31

3.4.4 Tratores e Tratores de esteira 32

3.4.5 Sistemas Scraper 35

3.4.6 Dragline 37

3.5 Tomada de Decisão 38

4 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO 38

4.1 Localização 38

4.2 Operação de Lavra 39

4.2.1 Operações Mineiras 39

4.2.2 Geometria de Mina 41

4.2.3 Desafios Operacionais 41

5 MÉTODO E ANÁLISES 42

5.1 Premissas Gerais 42

5.2 Cenários – Carregamento e Transporte de Minério 44
5.2.1 Caso Base (M0) 44
5.2.2 Cenário M1 – Escavadeira com caçamba modificada 45
5.2.3 Cenário M2 – Caminhão 55 t 46
5.2.4 Cenário M3 – Semirreboque 72 t 46
5.2.5 Cenário M4 – Minerador de Superfície 47
5.2.6 Dimensionamento de Frota e Equipes 49
5.3 Cenários – Remoção de Estéril 50
5.3.1 Caso Base (E0) 50
5.3.2 Cenário E1 & E2 – Operação Remota para Tratores 51
5.3.3 Cenário E3 – Sistema Scraper 54
5.3.4 Cenário E4 a E8 – Altura Operacional dos Tratores 55
5.3.5 Cenário E9 – Escavadeira de grande porte 57
5.3.6 Cenário E10 – Dragline 59
5.4 Modelagem de Custos e Avaliação Financeira 61
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 62
6.1 Carregamento e Transporte de Minério 62
6.2 Remoção de Estéril 65
6.2.1 Análise Operação Remota dos Tratores D11 67
6.2.2 Alternativa para rebaixo – Sistema Scraper 67
6.2.3 Análise da Altura Operacional dos Tratores 68
6.2.4 Escavadeira de Grande Porte e Dragline 69
6.2.5 Avaliação financeira e discussões 70
7 CONCLUSÕES 71
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73

1. INTRODUÇÃO

A bauxita é a principal fonte natural para extração do alumínio metálico, sendo o Brasil um importante player nesse mercado, com 8% das reservas de Bauxita do mundo (U.S.G.S, 2022). A demanda global por alumínio continua crescendo, mas as reservas de alto teor estão se esgotando, tornando a otimização das operações de lavra na extração da bauxita cada vez mais relevante para aumentar a produtividade nas operações unitárias de lavra, melhorar a segurança e reduzir os custos.

A mineração é uma atividade essencial para a humanidade, amplamente praticada em todo o mundo, e seus métodos de extração estão em constante evolução. Embora existam mais de trezentas variações de técnicas empregadas, há cerca de dez métodos de lavra principais que são majoritariamente aplicados (MACÊDO *et al.*, 2001). No Brasil, a lavra a céu aberto é amplamente predominante, especialmente nos projetos de minerais metálicos de grande porte (ANM, 2023).

Dentre os métodos de lavra a céu aberto, a lavra em tiras é um dos principais utilizados na mineração. Esse método consiste em cortes longos e paralelos que possuem uma alta relação comprimento/largura, onde a largura dos cortes que serão removidos em avanços sucessivos é determinada pelo tamanho dos equipamentos utilizados e pelas características do depósito (HARTMAN, 1992). Conforme mencionado por Hartman (1992), a produtividade no método de lavra por tiras está intimamente relacionada ao equipamento utilizado para o decapeamento. O uso de máquinas de grande porte permite reduzir o número de frentes na mina e aumentar a produtividade.

No entanto, o método de lavra em tiras apresenta uma desvantagem significativa em relação ao aumento da distância média de transporte (DMT) do minério. Como o avanço de lavra ocorre horizontalmente, o transporte do minério até o britador (ponto fixo) exige uma maior distância percorrida com o passar do tempo. No caso da bauxita, que é um minério de baixa densidade e alto volume, esse aumento na DMT impacta significativamente nos custos de produção da mina.

Para minimizar os custos de transporte e aumentar a eficiência da operação de lavra, a lavra em tiras deve ser associada à instalação de sistemas de transporte eficientes e à otimização da distribuição dos equipamentos na mina. Além disso, é importante destacar que a capacidade de reabilitação simultânea à operação de lavra é outra vantagem significativa da lavra em tiras. Com o depósito do capeamento sobre a área já lavrada, a tira pode ser considerada pronta para a reconformação e reabilitação (HARTMAN, 1992).

Nesse sentido, a pesquisa tem como objetivo identificar alternativas viáveis para a operação de mineração de bauxita em Juruti, com o propósito de torná-la mais eficiente e sustentável. A otimização das operações de lavra pode trazer ganhos significativos para a indústria de mineração como um todo, tais como aumento da produtividade, redução de custos e melhoria da segurança das operações.

Para alcançar o objetivo proposto, este estudo foi dividido em duas vertentes principais: alternativas para o carregamento e transporte de minério e alternativas para remoção de estéril. Foram propostas diversas

metodologias em diferentes cenários, em que foram realizados o dimensionamento de frota e desenvolvido um modelo de custos, a fim de compará-las com o caso base - a operação atual.

A pesquisa contribui para a evolução das técnicas de mineração, fornecendo informações relevantes para a tomada de decisão sobre as alternativas de operação de lavra mais adequadas. Além disso, a implementação das alternativas propostas pode impactar positivamente na economia e no meio ambiente, tornando a operação de mineração mais eficiente.

Em suma, a pesquisa apresentada neste trabalho é importante para a indústria de mineração de bauxita, uma vez que tem como objetivo explorar alternativas viáveis para a operação de mineração de bauxita em Juruti, com o propósito de torná-la mais eficiente. A otimização das operações de lavra pode trazer ganhos significativos para a indústria de mineração, tais como aumento da produtividade, redução de custos e melhoria da segurança operacional.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi explorar alternativas viáveis para a operação de mineração de bauxita em Juruti, a fim de torná-la mais eficiente, considerando os desafios enfrentados pela operação, tais como aumento da distância média de transporte e da relação estéril minério.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo traz uma revisão dos principais conceitos relacionados ao tema abordado neste trabalho, que incluem bauxita e suas características, operação de lavra, seleção de métodos de extração, descrição do método de lavra em tiras, dimensionamento e escolha de frota, além da descrição detalhada dos principais equipamentos utilizados em minas de bauxita no Brasil ou em operações similares.

3.1 Caracterização da Bauxita

A Bauxita é considerada a principal fonte natural para extração do alumínio metálico, uma vez que o alumínio não ocorre naturalmente em sua forma metálica. Essa rocha é composta principalmente por minerais de alumínio, como gibbsita, diásporo e boehmita, além de óxidos de ferro, argila, sílica, dentre outros componentes. Geralmente, apresenta uma coloração avermelhada em decorrência da presença de óxidos de ferro, mas também pode ser encontrada na cor branca. Pode-se categorizar a bauxita de acordo com sua aplicação industrial (SAMPAIO *et al.*, 2005):

- Bauxita Metalúrgica – Bauxita Metalúrgica: possui uma concentração mais elevada de gibbsita e é utilizada na produção de alumínio metálico. É beneficiada principalmente pelo processo Bayer, que visa a obtenção de alumina (Al_2O_3).
- Bauxita Não-Metalúrgica – possui uma concentração mais elevada de diásporo em relação aos outros óxidos e é utilizada para a produção de refratários, abrasivos, produtos químicos, entre outros.

Focando na Bauxita Metalúrgica, sua composição típica é 40%-60% de Al_2O_3; 12%-30% de H_2O combinada; 1%-15% de SiO_2 livre e combinada; 1%-30% de Fe_2O_3; 3%-4% de TiO_2; 0,05%-2% de outros elementos e óxidos (GREENWOOD, 1997).

Entre os componentes da bauxita, é importante ressaltar a presença da sílica, que pode se comportar de forma inerte no processo Bayer quando presente sob a forma de quartzo. No entanto, quando integrada à estrutura dos minerais de argila, a sílica reage com a soda cáustica e forma compostos insolúveis, por esse motivo, é denominada sílica reativa. Esse composto é considerado um deletério, já que quanto maior o teor de sílica reativa, maior o consumo de soda cáustica (DAMASCENO, 1998).

De acordo com a *United States Geological Survey* (2022), as principais reservas de Bauxita se localizam na Guiné (23%), Vietnam (18%), Australia (16%), e Brasil (8%), tendo o total estimado em torno de 32 bilhões de tonelada seca de reservas. Já em relação a produção global deste minério, o Brasil também é responsável por 8% do total produzido, sendo o segundo minério mais beneficiado do país, com cerca de 32 milhões de toneladas. (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO)

A demanda global por alumínio, a exaustão das reservas de alto teor, e o advento de novas tecnologias, motivam a busca pela otimização das operações de lavra na extração da bauxita. Esta otimização visa o ganho de produtividade nas operações unitárias de lavra, aumento do nível da segurança da operação consequentemente a redução dos custos.

3.2 Projeto de Mineração e o Planejamento de Lavra

A indústria de mineração tem como objetivo a exploração econômica de um recurso esgotável e não renovável, buscando maximizar sua riqueza durante o tempo de vida útil da mina. O projeto de mineração é composto por diversos estudos que são essenciais para o sucesso do empreendimento, e a qualidade e importância dada a cada etapa são determinantes para sua efetividade. (COSTA, 1979)

Um dos estudos cruciais para o projeto de mineração é o planejamento da lavra, que visa projetar a extração e otimizar a sequência de produção, reduzindo o volume de estéril movimentado, assegurando a segurança operacional e maximizando o valor do bem mineral, conforme afirmado por Silva (2008). É importante destacar que o planejamento de lavra é um processo contínuo, iniciando na fase de concepção do empreendimento e se estendendo até o seu fechamento.

Embora não nos aprofundemos no conceito de planejamento de mina neste trabalho, é fundamental compreender a relação entre o planejamento de lavra e sua execução. O planejamento consiste em prever o futuro, permitindo que a operação saiba onde, como e quando extrair o minério. Ao abordar o "como", é preciso considerar o método de lavra adequado, as unidades operacionais necessárias para a exploração do recurso e os equipamentos a serem utilizados.

3.2.1 Método de Lavra

A mineração é uma atividade essencial para a humanidade, amplamente praticada em todo o mundo, e seus métodos de extração estão em constante evolução. Embora existam mais de trezentas variações de técnicas empregadas, há cerca de dez métodos de lavra principais que são majoritariamente aplicados (MACÊDO *et al.*; 2001).

É possível constatar que há uma predominância de métodos de lavra a céu aberto em relação aos métodos subterrâneos, uma vez que esses apresentam vantagens como maior recuperação do depósito mineral, capacidade produtiva elevada, maior segurança operacional e maior flexibilidade em relação aos métodos subterrâneos (NILSSON, 1982).

Além disso, é fundamental destacar que as propriedades físicas do depósito mineral são limitantes na seleção do método de lavra, especialmente na escolha entre técnicas a céu aberto ou subterrâneas. Os métodos de lavra a céu aberto são economicamente viáveis em jazidas aflorantes, jazidas de capeamento relativamente reduzido e jazidas acessíveis em encostas (CURI, 2013). Os métodos de lavra subterrânea são

utilizados quando a jazida mineral está localizada em profundidade, quando a inclinação do corpo mineral não favorece a lavra a céu aberto e/ou quando as condições geotécnicas permitem a escavação, tornando os métodos subterrâneos mais favoráveis financeiramente e operacionalmente. (HUSTRULID; BULLOCK, 2001).

No Brasil, a lavra a céu aberto é amplamente predominante, especialmente nos projetos de minerais metálicos de grande porte. Segundo a Agência Nacional de Mineração (2023), dos 158 empreendimentos de grande e médio porte, 85% utilizam o método de lavra a céu aberto. É importante destacar que dentre esses empreendimentos, 72 são para a produção de minério de ferro, 20 para ouro e 12 para bauxita, todos operando a céu aberto. Em contrapartida, visando essas 3 commodities, há apenas 17 minas subterrâneas de ouro registradas.

É fundamental destacar que a escolha do método de lavra deve visar a viabilidade econômica, social e ambiental do empreendimento. Podemos resumir os principais objetivos da seleção do método como: (MACÊDO *et al.*; 2001)

1. Garantir a segurança operacional e a minimização dos impactos ambientais;
2. Reduzir os impactos ambientais e planejar o processo de reabilitação pós-mineração;
3. Assegurar as condições de estabilidade durante a vida útil da mina;
4. Otimizar a relação entre diluição e recuperação de minério;
5. Considerar a flexibilidade operacional e a infraestrutura necessária para a mina;
6. Maximizar a produtividade operacional e minimizar os custos.

Resumindo, as diversas características do método escolhido devem ser combinadas levando em consideração as características físicas da jazida, sua localização, disponibilidade de recursos naturais, humanos e financeiros, demanda e capacidade produtiva. O método ideal deve ser o mais econômico, produtivo, seguro e menos poluente possível (CURI, 2013).

3.2.2 Lavra em tiras

Um dos principais métodos de lavra utilizados na mineração é a lavra em tiras, que consiste em um método a céu aberto amplamente aplicado em depósitos tabulares, como carvão. Esse método é semelhante à lavra por bancadas, mas difere em diversos aspectos, como por exemplo, o fato de que o capeamento não é transportado para um bota-fora ou pilha de estéril, mas sim depositado diretamente nas áreas adjacentes já lavradas. (HARTMAN, 1992)

A extração de minério e estéril é realizada através de cortes longos e paralelos que possuem uma alta relação comprimento/largura. A largura dos cortes que serão removidos em avanços sucessivos é

determinada pelo tamanho dos equipamentos utilizados e pelas características do depósito, assim como a direção de avanço da lavra e as dimensões dos cortes (HARTMAN, 1992).

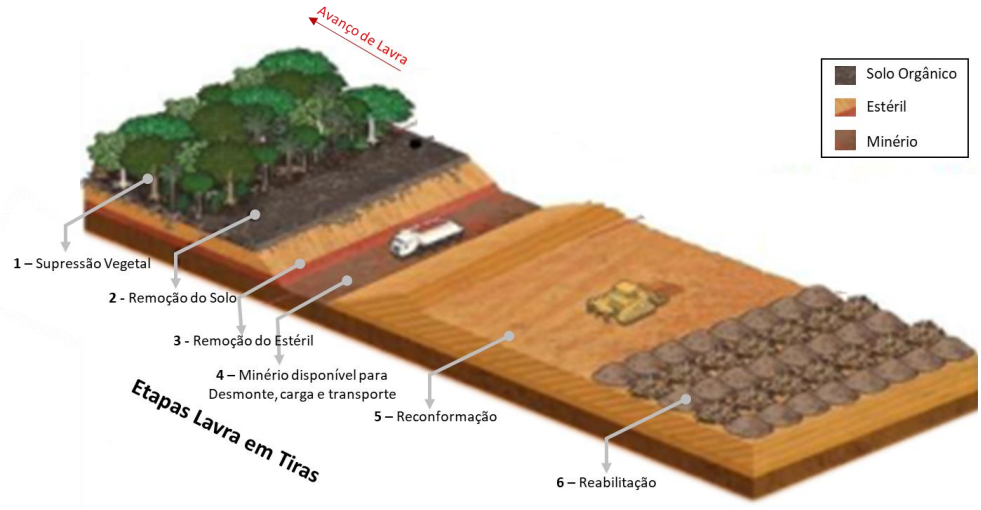
Ainda conforme mencionado por Hartman (1992), a produtividade no método de lavra por tiras está intimamente relacionada ao equipamento utilizado para o decapeamento. O uso de máquinas de grande porte permite reduzir o número de frentes na mina e aumentar a produtividade.

As informações apresentadas acima são aplicáveis de forma geral ao método de lavra em tiras. No entanto, ao focar nos depósitos tabulares de bauxita, algumas características vantajosas podem ser destacadas. Essas jazidas geralmente são cobertas por uma camada rochosa de pouca resistência, conhecida como capeamento. A remoção desta camada (decapeamento) é geralmente realizada por máquinas básicas de terraplanagem, como tratores de esteira e scrapers (SILVA, 2005). Como o capeamento é friável e pode ser depositado em áreas adjacentes, espera-se um baixo custo unitário para esta movimentação, já que o transporte ocorre em curtas distâncias.

Por outro lado, é importante destacar que o método de lavra em tiras apresenta uma desvantagem significativa no que diz respeito ao aumento da distância média de transporte (DMT) do minério. Como o avanço de lavra ocorre horizontalmente, o transporte do minério até o britador (ponto fixo) exige uma maior distância percorrida com o passar do tempo. No caso da bauxita, que é um minério de baixa densidade e alto volume, esse aumento na DMT impacta significativamente nos custos de produção da mina.

Além das vantagens já mencionadas, outra vantagem significativa da lavra em tiras é a capacidade de reabilitação simultânea à operação de lavra. Com o depósito do capeamento sobre a área já lavrada, a tira pode ser considerada pronta para a reconformação e reabilitação. A figura 1 ilustra essa interação de forma esquemática para uma melhor compreensão.

Figura 1 - Figura representativa das etapas da lavra em tiras



Fonte: Acervo pessoal do autor.

É fundamental destacar a relevância das atividades de manutenção e gestão dos acessos de mina, que segundo Thompson e Visser (2003), historicamente ocorrem de forma empírica, mas têm grande impacto na performance da operação. Construir e manter estradas de maneira inadequada pode ter consequências negativas significativas para a operação, especialmente em acessos de longo prazo e com alto volume de tráfego. A falta de investimento adequado em projeto e manutenção pode levar a falhas prematuras e custos excessivos na operação dos equipamentos, além de riscos de segurança. Por isso, é importante garantir que os serviços auxiliares de mineração sejam eficazes na construção e manutenção dos acessos, especialmente na lavra em tiras, onde os acessos secundários estão em constante avanço.

3.3 Dimensionamento e Seleção de Frota

A seleção de equipamentos para mineração é um processo complexo, como observado por AMARAL (2008), uma vez que não existem duas minas com características idênticas que permitam a seleção dos equipamentos mais adequados. Mesmo minas que possuem o mesmo tipo de minério podem apresentar características distintas de minério, condições climáticas e disposição de depósitos.

Os equipamentos de carregamento são geralmente selecionados para atender às condições de capacidade, mobilidade, condições climáticas e número de frentes de lavra simultaneamente (AMARAL, 2008).Para tomar decisões na seleção e dimensionamento dos equipamentos, SILVA (2009) sugere a consideração de vários critérios, como geologia do depósito, metas de produção, vida útil do projeto, disponibilidade de capital, custo de operação, parâmetros geotécnicos, *payback* e interferências com o meio ambiente. Além disso, é importante selecionar o porte dos equipamentos para que operem de forma conjugada, obtendo uma maior eficiência geral.

SILVA (2009) também enfatiza que além das restrições para a seleção de equipamentos, é importante considerar outros fatores que afetam diretamente a eficiência da operação, como o número de passes necessários para o carregamento do equipamento de transporte. É essencial evitar o excesso de unidades da frota de transporte, que pode causar dificuldades de tráfego, manutenção e gastos excessivos.

O dimensionamento incorreto da frota de equipamentos de lavra que trabalham em operação conjugada pode comprometer significativamente o desempenho dos equipamentos dependentes. Isso pode levar à formação de filas, atrasos na produção ou até mesmo ociosidade dos equipamentos (SILVA, 2009). Como a realização de atividades conjugadas é essencial para a lavra em tiras, a escolha e dimensionamento adequado dos equipamentos é indispensável e deve considerar todas as variáveis relevantes para garantir a eficiência da operação.

3.3.1 Dimensionamento de Frota por Indicadores de Produção

A avaliação de desempenho em processos industriais é essencial para o sucesso de uma empresa. Segundo Oliveira (2016), os indicadores de produção são utilizados para medir e comparar o desempenho de uma organização em relação às metas estabelecidas, permitindo a identificação de possíveis desvios. Oliveira (2016) também destaca a importância do monitoramento desses indicadores na gestão e análise de desempenho de processos industriais, ressaltando que eles são parâmetros fundamentais para avaliar os resultados de uma empresa. Com isso, a utilização de indicadores de produção tem ganhado cada vez mais relevância na abordagem de gestão e performance de processos.

Os indicadores de produção são importantes não apenas para a gestão e análise de desempenho, mas também para a avaliação da produção dos equipamentos. Clarke *et al.* (1990) afirmam que esses indicadores permitem estimar a produção dos equipamentos, considerando fatores como a taxa de utilização, disponibilidade, produtividade, eficiência de operação, número de equipamentos e horas totais programadas. Isso permite uma avaliação mais precisa da produção, bem como a identificação de possíveis gargalos ou problemas na operação dos equipamentos, possibilitando a tomada de medidas corretivas para melhorar a eficiência e a produtividade.

Avaliando a capacidade produtiva dos equipamentos com base nos indicadores de produção, é possível simular diferentes cenários e dimensionar a frota necessária para atingir as metas de produção na mineração. A Equação 1 ilustra o cálculo da produção com base nesses indicadores.

$$P = DFx\ UT\ x\ Prod_{ef}\ x\ HTP\ x\ N_{equip} \quad (1)$$

Na qual,

P - produção da frota (t)

DF - disponibilidade física que representa a percentagem do tempo que o equipamento fica à disposição do órgão operacional para a produção; (%)

UT - parcela em que o equipamento está em operação. (%)

$Prod_{ef}$ - produtividade efetiva (t/h)

HTP - corresponde às horas calculadas por ano, na base dos turnos previstos, já levando em conta a disponibilidade mecânica e/ou elétrica; (h)

N_{equip}. - número de equipamentos na frota (#)

Por sua vez, o número de equipamentos na frota pode ser calculado de acordo com a equação 2.

$$N_{equip}(\#) = \left(\frac{P_{anual}}{HT}\right)\ x\ \frac{1}{Prod} \quad (2)$$

Em que,

P_{anual}= produção anual (t)

HT = total de horas efetivamente trabalhadas (h)

A Equação 3 mostra o cálculo das horas trabalhadas HT:

$$HT \text{ (h)} = UT\ x\ DF\ x\ HTP \tag{3}$$

Para garantir a precisão do cálculo, é importante lembrar que, por se tratar de equipamentos, o resultado final deve ser arredondado para um número inteiro. Os indicadores de disponibilidade física e utilização são determinados com base na performance mecânica e/ou operacional. A equação 4 representa o cálculo da disponibilidade física, enquanto a equação 5 representa o cálculo da utilização.

$$DF\ (\%) = \frac{HTP-HM}{HTP}\ x\ 100 \tag{4}$$

Sendo,

HM = corresponde às horas de reparos na Oficina ou no Campo, incluindo a falta de peças no estoque ou falta de equipamentos auxiliares (h).

$$UT(\%) = \frac{HT}{HTP-HM}\ x\ 100 \tag{5}$$

O cálculo do indicador de produtividade efetiva ($Prod_{ef}$) é específico para cada operação que está sendo analisada, pois depende das particularidades da atividade. No entanto, existem alguns conceitos básicos que influenciam no cálculo de produtividade das operações unitárias em mineração, tais como:

A) Carregamento

- Volume da caçamba (Vc) – A capacidade operacional dos equipamentos de carregamento e transporte deve ser representada, considerando se estão em condição rasa ou coroada, representado pela equação 6.

$$Vc\ = \frac{(carga\ máxima\ admissível\ na\ caçamba)}{(peso\ especifico\ do\ material\ solto)} \tag{6}$$

- Fator de enchimento da caçamba (Fill Factor) – O fator de enchimento da caçamba é aplicado sobre a capacidade operacional do equipamento de carregamento e transporte e depende, principalmente, das características do material, das condições de desmonte, da altura da bancada e da forma de penetração do equipamento.
- Empolamento (e) – Refere-se ao aumento aparente de volume que a rocha apresenta após ser fragmentada. Esse conceito pode ser ampliado para se referir ao aumento aparente de volume em relação a um estado anterior de maior compactação, representado pela equação 8. O cálculo de empolamento depende do fator de empolamento, definido pela equação 7.

$$\lambda\ = \frac{\gamma_c}{\gamma_s} \tag{7}$$

onde,

λ = fator de empolamento;

γ_c = peso específico do material no corte;

γ_s= peso específico do material empolado ou solto

$$e = (\lambda - 1)\, x\, 100\% \quad (8)$$

onde:

e = empolamento.

Já para a determinação do volume após a fragmentação, utiliza-se do fator de empolamento, representado pela equação 9.

$$V_s = \lambda V_{cr} \quad (9)$$

onde:

V_{cr} = volume originalmente no “corte” ou volume “in situ”;

V_s = volume do material rochoso após a fragmentação.

- Carga de tombamento (tipping-load) – Utilizado para designar a carga máxima que uma escavadeira hidráulica pode suportar antes de perder o equilíbrio e tombar, considerando a posição em que a sustentação é mais desfavorável.

B) Transporte

- Tempo de ciclo – É o período de tempo necessário para que um equipamento execute uma sequência completa de operações, como manobra, carga, descarga, basculamento e deslocamento. O tempo de ciclo total de uma operação é a soma dos tempos de todas as atividades que compõem essa operação.
- Distância média de transporte (DMT) - A distância de transporte é a distância percorrida pelo material entre o ponto de extração (frente de lavra) e o ponto de destino (britador, pilha de estéril, entre outros).

C) Outras operações unitárias –É importante levar em consideração as especificidades de cada atividade na hora de realizar o cálculo de produtividade, utilizando fatores como a capacidade da lâmina de tratores e o ângulo da rampa para o Scraper System, por exemplo. Dessa forma, é possível obter um valor mais preciso e adequado à realidade da atividade em questão.

Os conceitos mencionados são aplicados em estudos e projetos para estimar os cenários avaliados, utilizando dados históricos como base para aumentar a precisão da estimativa. Além disso, em algumas operações, é utilizada simulação computacional para estimar os resultados.

3.3.2 Simulação Computacional e Otimização

A modelagem e simulação consistem em reproduzir um sistema por meio de modelos externos que capturem sua essência. De acordo com Gúzman (2012), sistema é a porção do mundo real que gera interesse

e que se deseja modelar, sendo que os modelos são simplificações das características consideradas importantes. Esses modelos, no entanto, assumem suposições e premissas que condicionam a precisão da resposta.

A simulação é uma das ferramentas da Pesquisa Operacional (P.O), disciplina que envolve ciências relacionadas à computação, matemática, economia e estatística. Segundo Dávalos (2002), o objetivo da P.O é melhorar o desempenho de organizações por meio da formulação de modelos matemáticos computacionais. Os dois tipos de modelos usuais em P.O são a otimização e a simulação. Os modelos de otimização buscam encontrar uma única solução ótima, enquanto os modelos de simulação apresentam maior flexibilidade para escolher a ação a ser tomada e permitem a análise de diversos cenários.

O objetivo das simulações é reproduzir o comportamento de um sistema real de forma representativa, modelando o comportamento dos diferentes componentes e variáveis que o compõem e suas interações, como afirma Léon (2015). A simulação de processos permite solucionar questões complexas para as quais os métodos quantitativos não são eficazes ou não podem ser aplicados.

Um exemplo de *software* que utiliza a simulação para estimar a produtividade de tratores em diferentes cenários é o DozSim da Caterpillar®. Para realizar a simulação, o *software* requer a inserção de algumas informações, como o sistema de medidas e unidades utilizadas, o tipo e disponibilidade física do trator, as dificuldades da operação, incluindo a movimentação do material, visibilidade, fator de eficiência, habilidade do operador e a utilização de explosivos. Além disso, o material a ser movimentado, incluindo a densidade e empolamento, e a geometria do pit, como a largura entre o pé da rampa e a parede da cava, ângulo da parede da cava em relação ao solo, largura da tira ou faixa, ângulo de corte, ângulo de deposição, espessura de estéril e espessura de minério, também são informações cruciais para a simulação.

3.4 Máquinas e Equipamentos de Lavra

3.4.1 Carga – Escavadeira Hidraúlica

Carregamento é o processo que consiste em retirar o material que já foi desmontado da frente de lavra e transportá-lo para um sistema de transporte. Essa atividade é realizada em conjunto com as operações de desmonte, sendo assim, é importante que elas estejam coordenadas de forma adequada, já que são atividades interdependentes.

De acordo com Coutinho (2017), um dos principais fatores para se alcançar uma maior produtividade e um menor custo operacional na mineração é a compatibilidade entre os equipamentos de lavra de toda a frota. Isso se deve ao fato de que a utilização de equipamentos compatíveis permite a otimização do tempo de ciclo, uma vez que as operações se tornam mais integradas e eficientes.

O processo de carregamento tem um impacto significativo no ciclo operacional de uma mina, sendo que uma produtividade baixa pode afetar a produção geral. Diversos fatores podem influenciar a eficiência dos equipamentos de carregamento, como o tamanho das praças de trabalho, o nivelamento do piso no ponto de carga, a fragmentação do material, o posicionamento dos caminhões e a experiência do condutor. A figura 2 traz uma foto do equipamento de transporte fazendo manobra para que a escavadeira possa realizar o carregamento do minério.

Figura 2 - Foto da etapa de carregamento em lavra de bauxita.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

Na mineração a céu aberto, há uma grande variedade de equipamentos de escavação utilizados na operação. Os equipamentos mais comuns que realizam a atividade de escavação são: pá carregadeira, escavadeira hidráulica de carregamento frontal, retroescavadeiras hidráulicas, escavadeiras elétricas, dragline, wheel dozer e bulldozer (LAGES, 2018). Cada equipamento de carga e transporte possuem uma capacidade específica, e é necessário determinar o número de passes do equipamento de carga de modo a otimizar este processo. É importante que esse número seja entre três e seis, caso contrário, a adequação dos equipamentos de carga ou transporte deve ser revista para otimizar o tempo de ciclo do sistema (COUTINHO, 2017).

Ao lidar com depósitos tabulares de bauxita, outro fator importante na escolha do equipamento de carga é a diluição. Norrena e Deutsch (2002) definem a diluição como a contaminação do minério por frações de material estéril e perdas, como porções de minério não recuperado que são misturadas e descartadas como material estéril. Devido à variação na espessura da camada de minério, é crucial escolher um equipamento de carga que permita uma maior seletividade e ajude a mitigar a diluição.

A escavadeira hidráulica de grande porte, apresentada na figura 3, pode ser uma ferramenta eficiente para a movimentação de materiais na mineração dispensando o uso de caminhões para transporte, caso a área de deposição seja próxima a área de corte. Com o alcance do braço e da lança da escavadeira, é possível retirar o material do local de origem e depositá-lo diretamente no local de destino. Esse método pode ser mais rápido e econômico em termos de combustível e manutenção, além de reduzir o tráfego de veículos na área de mineração. No entanto, é importante avaliar cuidadosamente as condições do terreno e a capacidade da escavadeira, para garantir a segurança e a eficiência da operação.

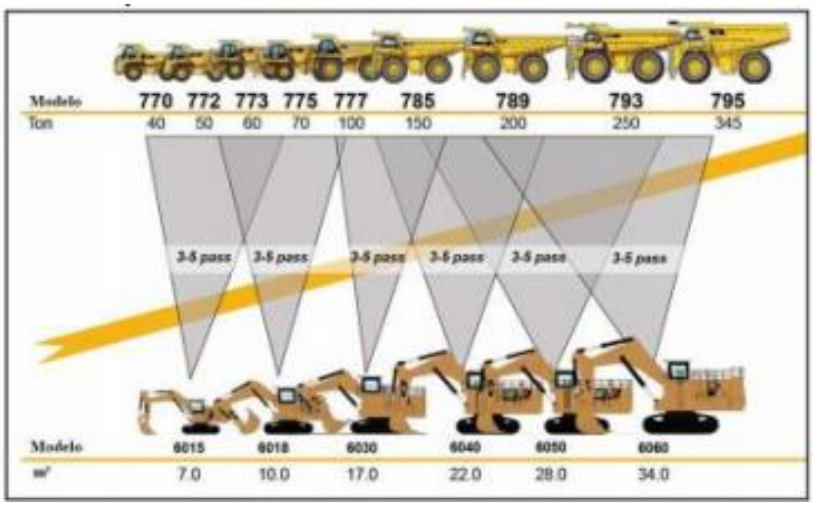
Figura 3 - Escavadeira de mineração R9250.

Fonte: Liebherr.

3.4.2 Transporte

Diversos métodos e sistemas de transporte de material são utilizados na mineração, mas o transporte por caminhões e correias são os mais frequentes, sendo o transporte por caminhões o mais comum. De acordo com Racia (2016), o uso de caminhões para o transporte de materiais foi impulsionado pela mecanização e avanços tecnológicos que permitiram um aumento na capacidade de carregamento e transporte nas últimas décadas. No entanto, limitações como problemas com pneus e outras estruturas resultam em um tamanho máximo para a capacidade dos caminhões, o que pode limitar os equipamentos de carga. A relação entre o tamanho dos caminhões e escavadeiras e o número de passadas necessárias de cada equipamento de carga para o enchimento do caminhão pode ser visualizada na figura 4 abaixo.

Figura 4 - Relação de compatibilidade entre caminhões fora de estrada e escavadeiras hidráulicas



Fonte: Lages (2018).

A etapa de transporte na mineração refere-se a, por meio de caminhões, movimentar materiais da área de extração até o destino final na mina. É necessário transportar o minério até as áreas de armazenamento, onde passará por processos de estoque e britagem, enquanto o estéril deve ser levado para pilhas ou depósitos específicos (COUTINHO, 2017).

Nos últimos anos, a redução dos custos de transporte tem sido alcançada principalmente por meio da economia de escala, com o aumento do tamanho dos caminhões. Adicionalmente, há oportunidade de redução de custos associada às possibilidades de aumentar a produtividade por meio de um gerenciamento otimizado do sistema de despacho, que aloca os caminhões de forma eficiente (COUTINHO, 2017).

Na indústria de mineração, os caminhões são divididos em dois tipos principais: o caminhão rodoviário e o caminhão fora de estrada. Enquanto o caminhão rodoviário tem uma capacidade de transporte menor, ele é viável para o transporte em grandes distâncias de minério. Esse tipo de caminhão possui rodas com pneus e, embora tenha sido projetado originalmente para oferecer transporte eficiente em superfícies planas e regulares, os fabricantes agora oferecem modelos com tecnologia *off-road* que tornam sua aplicação possível em minerações. A figura 5 traz uma foto deste tipo de caminhão.

Figura 5 - Foto de caminhão rodoviário em operação de mineração.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

Já o caminhão fora de estrada é projetado para operar em terrenos irregulares, como terrenos acidentados, rochosos e inclinados, com a finalidade de transportar grandes quantidades de materiais como minério, terra e outros materiais de mineração. Eles são geralmente maiores e mais resistentes do que caminhões rodoviários e têm tração nas quatro rodas para superar obstáculos no terreno.

Embora o caminhão fora de estrada, apresentado na figura 6, tenha algumas vantagens em relação ao caminhão rodoviário em termos de transporte de grandes quantidades de materiais em terrenos difíceis, ele apresenta algumas desvantagens, principalmente em grandes distâncias de transporte. Eles geralmente têm um alto consumo de combustível e uma velocidade de transporte mais baixa, o que pode aumentar o tempo de transporte e, consequentemente, o custo operacional. Além disso, eles requerem uma manutenção mais frequente devido ao desgaste dos pneus e das peças.

Figura 6 - Imagem de caminhão fora de estrada CAT 772G.

Fonte: Caterpillar.

3.4.3 Minerador de Superfície

Os mineradores de superfície são equipamentos versáteis, capazes de realizar três operações unitárias em um único processo. Eles foram projetados para operar no maciço rochoso, com um grande poder de corte e cominuição do material, permitindo o carregamento direto dos caminhões por meio de uma correia transportadora integrada ao próprio equipamento. Em alguns casos, a etapa de carregamento é realizada com o auxílio de outros equipamentos

Embora os mineradores de superfície sejam amplamente utilizados em minas a céu aberto, eles também têm aplicações em obras civis, como nivelamento para construção de estradas e ferrovias, construção de canais, recuperação de vias, corte preciso de valas e aterros (WIRTGEN, 2023).

Conforme destacado por Curi e Filho (2015) é crucial levar em consideração certos parâmetros que afetam diretamente ou indiretamente a eficiência do minerador de superfície na operação de corte, a fim de alcançar resultados satisfatórios e altos índices de produtividade. A tabela 1 apresenta uma lista desses parâmetros.

Tabela 1 - Parâmetros que afetam a eficiência do minerador de superfície na operação de corte.

Aplicações	**Configurações Operacionais**	**Características do maciço**
Modo de operação, a disposição do material fragmentado (como carregamento direto, disposição em pilhas ou carregamento via equipamento auxiliar), as dimensões da área de trabalho, as condições específicas (como granulometria e produção desejados, tipo de material) e a habilidade do operador	Ângulo de inclinação, o ângulo de afastamento e o ângulo de furação, além da disposição, composição e número de bits, largura do tambor e potência do motor, dentre outros aspectos relevantes.	Densidade, a resistência uniaxial à compressão (UCS), o índice de dureza, o módulo de Young, a energia de fratura, a abrasividade, a viscosidade volumétrica, entre outras

Fonte: Adaptado de Dey e Ghose (2011 *apud* Dias, 2017, p. 29)

Os mineradores de superfície contam com um tambor de corte de alta potência equipado com bits revestidos de materiais capazes de penetrar e triturar a rocha. Utilizando o sistema "*Top Down Cutting*", os bits penetram na rocha de cima para baixo com um ângulo que maximiza a eficiência da operação de corte, reduz as vibrações do solo e o consumo de combustível (WIRTGEN, 2023). As empresas líderes de mercado,

como Wirtgen e Vermeer, apresentam diferenças em relação à disposição do tambor no equipamento e à forma como o material triturado é transferido para os caminhões, que serão responsáveis pelo transporte.

De acordo com Pimentel (2013), a drenagem de cava é um aspecto crucial para o sucesso da operação do minerador de superfície. Diferentemente das demais frentes de lavra da mina, o minerador de superfície requer condições de drenagem mais específicas devido às limitações do equipamento em áreas alagadas. Para evitar que o nível de água alcance a caixa de correias do tambor de corte, é extremamente importante que as áreas disponibilizadas para o sistema de lavra contínua sejam niveladas durante a realização do primeiro corte e ao término do decapeamento, além de outras medidas operacionais para reduzir o acúmulo de água no fundo da cava. Esse aspecto é particularmente importante para a mineração de bauxita na região amazônica, que é caracterizada por altos índices pluviométricos.

3.4.4 Tratores e Tratores de esteira

Conforme definido por Ricardo e Catalini (2007), um trator é uma unidade autônoma que pode tracionar ou empurrar outras máquinas e receber diversos implementos para realizar diferentes tarefas. Existem dois tipos de tratores: aqueles que operam sobre esteiras (figura 7) e aqueles que operam sobre rodas (figura 8). De acordo com os autores, essas máquinas possuem várias características marcantes, tais como:

- Grande potência e torque para realizar trabalhos pesados;
- Controle preciso da velocidade e direção, permitindo manobras em espaços restritos;
- Capacidade de operação em diferentes tipos de terreno, desde solo firme até terrenos alagados ou íngremes;
- Adaptabilidade a diferentes implementos, tornando-se uma ferramenta versátil para atividades agrícolas, de construção, mineração, entre outras.

Figura 7 - Foto de trator de esteira CAT D6.

Fonte: Caterpillar

Figura 8 - Foto de trator de rodas CAT 834K.

Fonte: Caterpillar

A tabela 2 oferece uma visão geral comparativa dos dois tipos de equipamentos.

Tabela 2 - Comparação entre trator de rodas e trator de esteira.

Característica	Trator de esteira	Trator de rodas
Esforço do trator	Elevado	Elevado
Aderência	Boa	Péssima
Flutuação	Boa	Regular
Balanceamento	Bom	Bom
Velocidade	Baixa	Alta

Fonte: Adaptado de Ricardo e Catalani (2007).

Os tratores de esteira são amplamente utilizados em tarefas que exigem alta potência, como em terrenos íngremes ou com baixa capacidade de suporte. Eles são ideais para tarefas que não exigem alta velocidade e são executadas em curtas distâncias, geralmente inferiores a 100 metros. Entretanto, devido à sua baixa velocidade, esses tratores não são adequados para tarefas que exigem deslocamento em grandes distâncias, pois isso pode afetar negativamente a produtividade e aumentar o tempo necessário para completar o trabalho. Uma característica importante dos tratores de esteira é a sua capacidade de empurrar grandes quantidades de material sem patinar, o que os torna eficientes em tarefas que envolvem movimentação de carga pesada. (RICARDO & CATALANI, 2007).

O trator de esteira pode ser equipado com uma lâmina, o que o transforma em um trator de lâmina, ou bulldozer (conforme figura 8), permitindo que se torne uma unidade escavo-empurradora capaz de escavar e empurrar materiais. Com a lâmina, o trator de esteira apresenta alta versatilidade em trabalhos de

terraplanagem, sendo capaz de executar diversas tarefas, como corte em meia encosta, corte com o canto de lâmina, roda motriz, rodas de guia, roletes, corte em trincheiras, escarificação, espalhamento de terra em ponta de aterro, dentre outros (RICARDO & CATALANI, 2007).

De acordo com Celso (2014 *apud* Abreu, 2017 p.21), no corte em meia encosta, o trator de esteira utiliza o modo angle-dozer, que ajusta a angulação da lâmina por meio da extensão de um dos cilindros, permitindo que o corte e a deposição do material ocorram na direção do cilindro que não foi estendido. Durante essa atividade, o trator constrói sua própria plataforma de trabalho e compacta o material depositado à medida que a esteira passa sobre ele. Além disso, o trator pode ser utilizado na construção de canais de drenagem nas frentes de serviço, fazendo uso do recurso canto de lâmina, que permite realizar cortes no centro do canal com a profundidade desejada. O espalhamento de terra em ponta de aterro é uma das atividades mais importantes executadas pelo trator, pois ele empurra as pilhas de materiais depositados por caminhões basculantes ou motorscrapers a curtas distâncias, a fim de formar camadas com espessuras iguais que serão compactadas posteriormente.

Optar pelo tipo adequado de lâmina para ser acoplada ao trator é crucial para maximizar sua produtividade. Nessa seleção, é importante considerar o tipo de serviço que será executado com mais frequência pelo trator, as características do material a ser movimentado e as limitações do próprio trator, de acordo com a Caterpillar (2009).

Segundo Celso (2014 apud Abreu, 2017 p.21), tratores de esteira de grande porte podem ser utilizados para desmonte mecânico, evitando o uso de explosivos na etapa de fragmentação. Nesse caso, o material é escarificado com o uso de dois componentes: o ripper e o shank, localizados na parte posterior do trator e movimentados por cilindros hidráulicos. O ripper é uma estrutura metálica que sustenta o shank, que é o elemento cortante responsável por fragmentar o material e permitir o desmonte mecânico, apresentados em destaque na figura 9.

Figura 9 - Escarificadores em trator de esteira.

Fonte: Adaptado de Caterpillar.

3.4.5 Sistemas Scraper

Segundo Ricardo e Catalini (1990), o sistema scraper é um equipamento amplamente utilizado em serviços de terraplenagem escavo-transportador, ou seja, além de escavar, ele também transporta e descarrega o material. No entanto, esse sistema também é utilizado na mineração a céu aberto, pois é eficiente e econômico na remoção de grandes quantidades de solo e rocha.

Para realizar o carregamento, é necessário inclinar a caçamba do sistema até que ela encoste no solo. Em seguida, uma lâmina localizada no fundo da caçamba começa a cortar o solo, enquanto o equipamento está em movimento e a caçamba é preenchida pelo material cortado. Quando o carregamento está completo, a caçamba deixa de tocar o solo e o sistema pode se movimentar por conta própria até o local de descarregamento.

No momento do descarregamento, é acionado um pistão no equipamento, que empurra uma placa dentro da caçamba, fazendo com que o material seja despejado pela mesma abertura utilizada para o corte. Como o fundo da caçamba fica paralelo ao terreno, o material é descarregado de forma eficiente. Hoje, há duas principais tecnologias sendo empregada na mineração:

A. O Motoscraper da Caterpillar é composto por um trator de esteira, que fornece a energia para movimentar a lâmina de corte e as rodas raspadoras, responsáveis por coletar e transportar o material, apresentado na figura 10. O sistema de transporte é automatizado e pode ser ajustado de acordo com a necessidade da operação.

Figura 10 - Motoscraper recebendo *pushing.*

Fonte: *The Construction Index.*

B. O sistema Scraper John Deere, apresentado na figura 11, consiste em 2 caixas de raspagem modelo 2412D, cada uma com capacidade de volume de 18,3 m³, e o trator de pneus 9520R, com 520 cavalos de potência e peso operacional total de 46 toneladas, que faz a força de tração para as caixas.

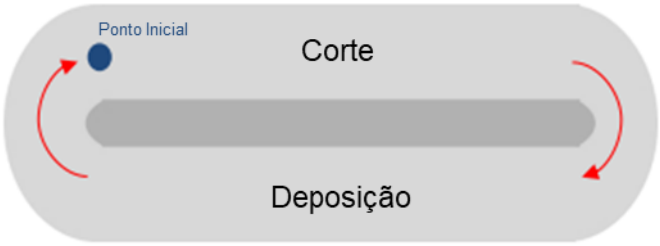
Figura 11 - Sistema Scraper John Deere.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

Na área de mineração, utiliza-se o sistema scraper para retirar o estéril a fim de expor a camada de minério. Esse sistema pode ser aplicado em diferentes tipos de terreno, inclusive em áreas íngremes ou com obstáculos, mas é necessário um planejamento cuidadoso levando em consideração a topografia, as condições climáticas e a disposição dos materiais, a fim de evitar problemas como deslizamentos e instabilidades nas encostas.

Na lavra de bauxita, a operação do sistema scraper é caracterizada pelo método de corte e aterro, onde o equipamento realiza o corte e carregamento em uma direção (linha reta) e descarrega no sentido contrário, retornando ao ponto inicial. A figura 12 abaixo mostra um projeto esquemático aéreo desse sistema.

Figura 12 - Imagem esquemática do método de operação do sistema scraper John Deere.



Fonte: Autor (2023)

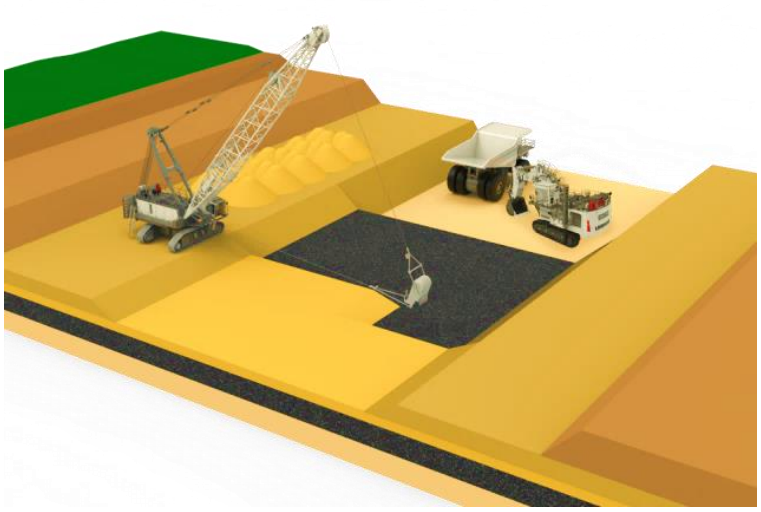
O sistema realiza o carregamento e descarregamento enquanto percorre a área de remoção do material de cobertura. As rampas de acesso a ambas as áreas não devem ser íngremes para evitar problemas como deslizamentos ou instabilidades, que podem resultar em risco de colisão.

No sistema scraper, são esperadas algumas dificuldades operacionais. É necessário contar com serviços auxiliares para desenvolver rampas de acesso, barreiras de segurança e movimentação de materiais para manter a área operacional. Além disso, o sistema scraper não pode operar sob chuva devido a restrições de segurança e perda de produtividade, pois o solo perde a tração quando está molhado. Se o solo estiver úmido ou saturado, o trator não consegue obter tração para carregar o material, levando mais tempo para concluir um ciclo. Além disso, a perda de tração adiciona riscos à operação, principalmente nas rampas de acesso.

3.4.6 Dragline

A operação de dragline é uma técnica amplamente utilizada na mineração a céu aberto, sendo especialmente aplicada em depósitos tabulares de bauxita e carvão para a remoção da camada de estéril. A figura 13 traz um esquema da aplicação mais usual deste equipamento. A dragline é uma máquina de escavação que se assemelha a uma grande grua, movida por um sistema hidráulico ou elétrico, com uma enorme caçamba suspensa por um cabo. Utiliza-se da caçamba para retirar o material da superfície, e o deposita em um local apropriado fora da área de mineração (VELOSO, 2017).

Figura 13 - Figura esquemática de dragline para remoção de estéril em lavra de superfície.



Fonte: Liebherr.

A utilização de draglines em depósitos tabulares de bauxita é viável economicamente, pois permite um aumento significativo na produtividade. No entanto, requer um alto nível de manutenção, devido ao seu grande porte e complexidade. Algumas considerações operacionais adicionais são muito importantes de destacar:

- A Dragline só pode ser utilizada em materiais de baixa competência, como por exemplo Argilas, não possuindo força suficiente para escavar materiais mais duros como a camada de laterita.
- Para alturas de material estéril acima de 16 metros, é aconselhável usar um equipamento auxiliar para mover o material extra acima desse limite.
- A Dragline é conhecida por seu bom desempenho durante a estação chuvosa também.
- Baixo consumo de diesel (redução de emissões de gases poluentes / aumento da eficiência operacional na mina).
- Disposição direta do material na pilha de rejeitos, sem a necessidade de caminhões para transporte.

- Este equipamento tem por característica alto tempo de vida (~100 000h), o que pode compensar o alto investimento inicial.

3.5 Tomada de Decisão

De acordo com Gomes *et al.* (2009), a tomada de decisão envolve a seleção de pelo menos duas alternativas para resolver um problema que terá consequências futuras, podendo ser de curto ou longo prazo, ou uma combinação de ambos. Para tomar a decisão correta, é necessário analisar diferentes cenários e avaliar as possíveis alternativas de acordo com as estratégias envolvidas na sua implementação. Como a elaboração de estratégias envolve muitas áreas diferentes, como tecnologia, economia, política, jurídica, social, institucional e humana, as consequências devem ser avaliadas em todas essas áreas. É importante levar em conta fatores tanto quantitativos quanto qualitativos.

Segundo Clarke *et al.* (1990), após o dimensionamento de todos os equipamentos necessários para a movimentação da produção planejada a cada ano, a estimativa dos custos operacionais e a estratificação desses custos para melhor análise e comparação dos cenários, cabe ao tomador de decisão escolher o cenário mais viável economicamente, considerando os riscos envolvidos em cada alternativa. Alguns riscos incluem mudanças no cenário externo, possíveis perdas de produção durante o período de transição entre um processo e outro e erros de planejamento que possam aumentar os custos de produção. É essencial identificar, medir e analisar todos os riscos envolvidos na mudança de qualquer processo produtivo para que ações mitigadoras adequadas possam ser tomadas.

4 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

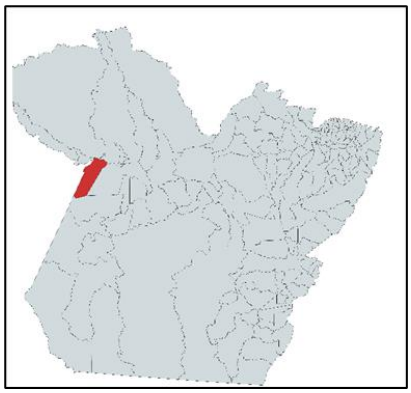
Neste capítulo serão apresentados detalhes sobre a operação de mina de bauxita no município de Juruti, PA, incluindo as etapas do processo, os equipamentos utilizados, as técnicas de extração, as medidas de segurança adotadas e as principais características do minério, visando fornecer um panorama completo da operação e o contexto deste estudo.

4.1 Localização

A mina de bauxita de Juruti é gerenciada pela Alcoa e está localizada no município de Juruti/PA, situado próximo às margens do Rio Amazonas, no oeste do Pará. A cidade é destacada na Figura 14 e fica a cerca de 200 km da cidade de Santarém, que é o maior centro econômico da região. O município possui uma área de aproximadamente 8 304 km² e uma população de 59 961 habitantes, de acordo com o Instituto Brasileiro

de Geografia e Estatística de 2021. Em 2010, a população estimada era de 47 086, crescendo 27% em 10 anos. A mina está localizada a cerca de 60 km do centro da cidade e o principal acesso é pela estrada PA 257.

Figura 14 - Mapa do estado do Pará, com o município de Juruti em destaque.



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Histórico

A empresa Reynolds Metals iniciou os primeiros estudos de pesquisa e prospecção na área da mina de Juruti no início da década de 1970 nos platôs Central e Capiranga. Posteriormente, na década de 1990, as áreas de pesquisa foram expandidas com a aquisição dos direitos de pesquisa dos platôs Mauari e Central Sul. Em 2000, a Alcoa adquiriu os direitos de pesquisa na região da Reynolds Metals e iniciou pesquisas mais aprofundadas nos platôs Capiranga, Mauari e Guaraná, situados nos limites da cidade de Juruti.

A mina de bauxita de Juruti possui um dos maiores depósitos e de mais alta qualidade dentre as reservas de bauxita do mundo, com um potencial total estimado em cerca de 700 milhões de toneladas métricas.

O projeto Juruti foi inaugurado em 15 de setembro de 2009, com capacidade inicial de produção de 2,6 milhões de toneladas métricas por ano de bauxita lavada. Atualmente, a capacidade produtiva do empreendimento é de 9 milhões de toneladas métricas por ano de *run of mine* (ROM).

4.2 Operação de Lavra

4.2.1 Operações Mineiras

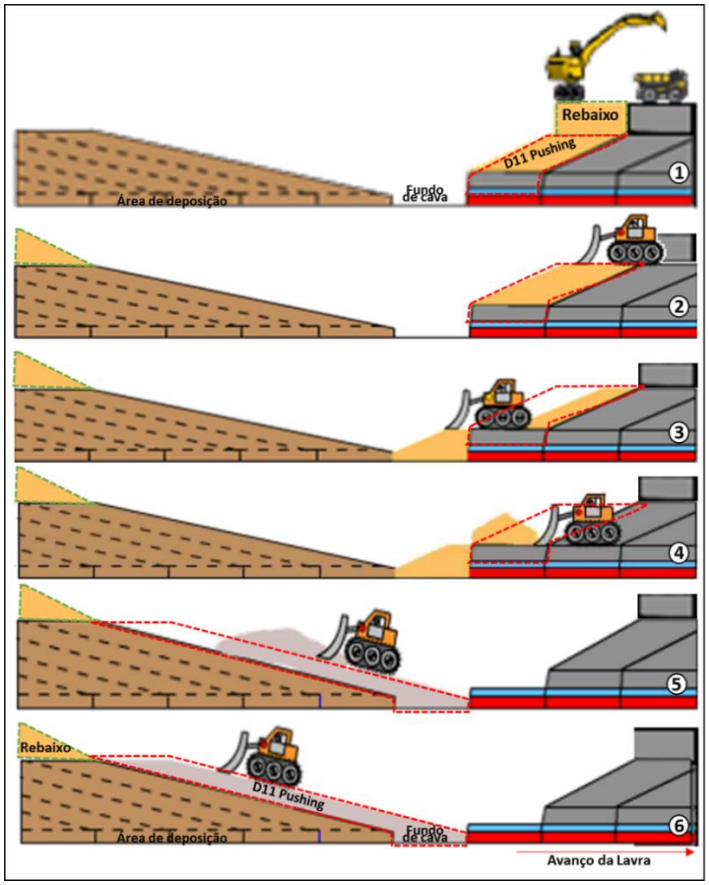
A operação de lavra em Juruti segue um processo dividido em quatro etapas: supressão vegetal, decapeamento/remoção do estéril, carregamento e transporte do minério e reabilitação.

Durante a primeira etapa, que é a supressão vegetal, tratores são utilizados para remover a vegetação, sendo que o material é preservado para uso posterior na reabilitação. Essa atividade é realizada apenas durante os meses de julho a dezembro, quando a região apresenta clima seco, pois as chuvas intensas dificultam a operação nos outros meses.

A segunda etapa é a remoção do estéril, que é feita principalmente por três equipamentos: o trator CAT D11 SD, a escavadeira hidráulica com peso operacional de 70t, e o caminhão rodoviário. O conjunto de escavadeira e caminhão é flexível e utilizado para atividades de infraestrutura, box cutting e rebaixo. O rebaixo é aplicado em regiões com grande espessura de estéril, o que permite diminuir a distância de transporte do D11, gerando ganho de produtividade.

O trator D11 é responsável pelo maior volume de remoção, pois sua atividade ocorre nas tiras de produção, removendo a argila sobrejacente à camada de laterita e depositando-a sobre o fundo de cava e áreas já lavradas, essa atividade é conhecida como pushing. A figura 15 abaixo é um esquema representativo das operações unitárias de remoção do estéril aplicadas atualmente.

Figura 15 - Esquema representativo da operação de remoção de estéril em lavra em tiras com trator de esteiras CAT-D11.



Fonte: Acervo pessoal do autor.

A operação de pushing consiste no corte em rampa da camada de estéril e a transferência do material até a cava recém lavrada utilizando-se dos tratores. Após a cava ser completamente preenchida, inicia-se o procedimento de deposição no depósito de estéril, onde o trator, à medida que transporta o material, realiza uma leve subida no sentido oposto ao avanço da lavra.

É importante ressaltar que, para a remoção de laterita, pode ser necessário realizar o desmonte mecânico, fazendo a escarificação com o ripper e o shank, localizados na parte posterior do trator, e depois é realizado o pushing para a área de deposição, ou então carregado e transportado para posterior aplicação em infraestrutura de mina.

Na terceira etapa, é utilizada escavadeira hidráulica de 50t ou 70t e caminhão rodoviário com capacidade de transporte de 46t para o carregamento e transporte do minério, pós escarificação com trator D11.

Por fim, na última etapa, ocorre a reabilitação da área lavrada, onde a vegetação é reintroduzida utilizando o material preservado durante a supressão vegetal.

4.2.2 Geometria de Mina

A geometria da mina é um fator crucial para seu funcionamento eficiente e seguro. A largura da faixa e o comprimento da mina determinam a área disponível para as operações de mineração. Já os ângulos de corte e deposição são importantes para determinar a quantidade de material a ser removido para alcançar as camadas de minério.

- Largura da faixa da mina: 20 metros
- Comprimento da mina: 200 metros
- Ângulo de corte para a remoção de cobertura: 17 graus para o D11
- Ângulo de deposição: 8 graus para o D11

Além disso, a espessura da camada de cobertura também é um fator a ser considerado na remoção do material estéril. Se a camada tiver mais de 12 metros de espessura, será utilizada uma escavadora hidráulica e caminhões para transportar o material para um depósito. Se a camada tiver menos de 12 metros, será usada uma lâmina D11 para remover o material estéril.

Com essas informações sobre a geometria e a remoção das camadas de cobertura, é possível planejar as operações de mineração de forma mais eficiente e segura.

4.2.3 Desafios Operacionais

A mina de Juruti, iniciou as operações em 2009 no Plato Capiranga, e enfrenta desafios operacionais decorrentes do avanço da mina e da necessidade de operações em novas áreas. A mudança de localização implica em um aumento da distância de transporte, além de alterações no perfil do depósito, tais como aumento da relação estéril/minério, e do volume de estéril a ser rebaixado, já que ocorre o aumento da espessura da camada de estéril. Essas mudanças resultam em uma série de desafios operacionais e em uma tendência de aumento dos custos. O presente projeto tem como objetivo mapear métodos alternativos de mineração para parcialmente diminuir essa tendência de aumento de custos, tendo em vista as limitações do atual modelo operacional e os desafios previstos.

5 MÉTODO E ANÁLISES

O presente estudo teve como objetivo analisar diferentes cenários e avaliar possíveis alternativas para a operação de lavra da mina, comparando com um cenário base que representa a operação atual. Para isso, foi realizada uma pesquisa exploratória, com abordagem qualitativa e quantitativa, utilizando-se como método a análise de dados secundários.

Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura a fim de se obter um panorama das melhores práticas em operações de mineração e das tecnologias mais recentes disponíveis no mercado. Em seguida, foram coletados dados sobre a operação atual da mina, tais como frota de equipamentos, produtividade, custos operacionais e indicadores de segurança.

Com base nos dados coletados, foram criados diferentes cenários para a operação da mina, considerando aspectos como segurança, custos operacionais, operabilidade e manutenção. Estes cenários serão analisados e discutidos em dois principais grupos, alternativas para carregamento e transporte de minério e alternativas para remoção de estéril. Para cada cenário, foram definidos objetivos específicos e foram selecionadas alternativas para atingir esses objetivos, tais como a aplicação de novas tecnologias, mudanças na metodologia de mineração e sinergia entre as frotas.

Assim, a metodologia utilizada neste estudo consistiu na análise de dados secundários, criação de diferentes cenários, definição de objetivos específicos e seleção de alternativas para atingir esses objetivos, além de análises comparativas entre os cenários propostos e a operação atual.

5.1 Premissas Gerais

As premissas para os equipamentos de mineração foram avaliadas através de dados históricos, simulações de processo e informações de fornecedores. Foram consideradas premissas detalhadas para a

produtividade dos equipamentos, disponibilidade física, utilização e consumo de combustível. No que diz respeito ao transporte, a produtividade foi calculada com base no plano de mina.

Em sumo, as principais informações consideradas para o dimensionamento de frotas estão listadas abaixo. Para cada cenário foi considerado a premissa mais apropriada, considerando caracterização, dados históricos, simulações, cálculos e informações dos fornecedores.

- Características do Depósito de Minério (Ex.: Densidade, Ângulo de Repouso, Resistência do Solo);
- Plano de Lavra Longo Prazo (Ex.: Volume de produção anual, DMT);
- Produtividades;
- Curva de disponibilidade física dos equipamentos de acordo com a vida útil;
- Taxa de utilização dos equipamentos;
- Vida útil dos equipamentos;

Já em relação as premissas para o modelo financeiro, premissas financeiras essenciais, como taxas de câmbio, impostos, custos de frete, inflação e benefícios fiscais foram considerados. Cada premissa foi embasada em análises de histórico, estudos anteriores, previsões e cotações relevantes, assegurando a solidez das avaliações realizadas.

No estudo em questão, várias premissas foram adotadas para dimensionar as equipes de operação e administrativas, bem como para calcular os custos associados à força de trabalho. O dimensionamento da equipe operacional foi realizado de acordo com as frotas estudadas, levando em consideração a quantidade de turmas necessárias para operação 24/7, taxa de absenteísmo e férias. Além disso, foram consideradas as equipes administrativas necessárias para cada cenário. Os custos de capital relacionados a recursos humanos incluíram custos de moradia e de benefícios aplicáveis, enquanto os custos operacionais incluíram salários e benefícios para cada categoria profissional.

No que diz respeito aos custos de capital (CapEx) dos equipamentos e tecnologias, foram realizadas cotações com fornecedores ou considerados valores históricos e referências de mercado, levando em conta também as devidas logísticas. Já quanto a custos operacionais (OpEx), além do consumo de combustível, os custos operacionais incluem mão de obra, manutenção, peças sobressalentes, consumo de materiais rodantes e pneus, e infraestrutura da mina, além de outros aplicáveis.

Embora custos de conectividade da mina não tenham sido incluído no estudo, este é um importante habilitador de muitas tecnologias e, portanto, é importante entender como a rede afeta cada cenário e avaliá-la qualitativamente.

É crucial destacar que os cenários M0 e E0, que servem como base para comparação, refletem a situação atual da operação, incluindo o modelo operacional adotado atualmente, o qual é gerenciado por uma empresa terceirizada. Este modelo possibilita que todos os custos relacionados à operação sejam classificados como

custos operacionais, já que não há investimento de capital envolvido. Todos os demais cenários analisados consideram a operação sendo realizada internamente.

5.2 Cenários – Carregamento e Transporte de Minério

5.2.1 Caso Base (M0)

O caso base (M0) consiste em um processo que utiliza três equipamentos principais: um bulldozer CAT D11, uma escavadeira hidráulica CAT 349 e outra escavadeira hidráulica CAT 374. O processo começa com o uso do bulldozer CAT D11 para realizar a escarificação da rocha. Esse equipamento é conhecido por sua robustez e potência de 850 Hp, que com o implemento single shank, em destaque na figura 16, permite realizar o desmonte.

Figura 16 - Trator CAT D11 com implemento single shank.

Fonte: Adaptado de Wikimedia Commons.

Em seguida, as escavadeiras hidráulicas são utilizadas para realizar a extração do minério. A CAT 349 é utilizada em áreas com baixa espessura de minério, pois possui uma caçamba menor, com capacidade de 3,2 m³ e altura de 1,5 m. Embora seja menos produtiva do que a CAT 374, a CAT 349 garante uma maior seletividade na extração, pois pode trabalhar de forma mais precisa em áreas com menor espessura de minério. No entanto, como a sua capacidade é menor, o carregamento é realizado em 9 passes.

Já a CAT 374 é utilizada em áreas com maior espessura de minério, devido à sua maior capacidade de caçamba, com 4,2 m³ e altura de 1,8 m. Com isso, a CAT 374 pode carregar mais minério em menos tempo, realizando o carregamento em apenas 7 passes.

Para o transporte do minério extraído até o local de descarga, é utilizado um caminhão com capacidade para transportar até 46 toneladas ou 30 m³ de carga, que vamos chamar nesse estudo de *Caminhão 46t*. Esse

caminhão é equipado com um motor de 500 Hp e possui configuração 8x4 para garantir uma maior estabilidade e segurança durante o transporte.

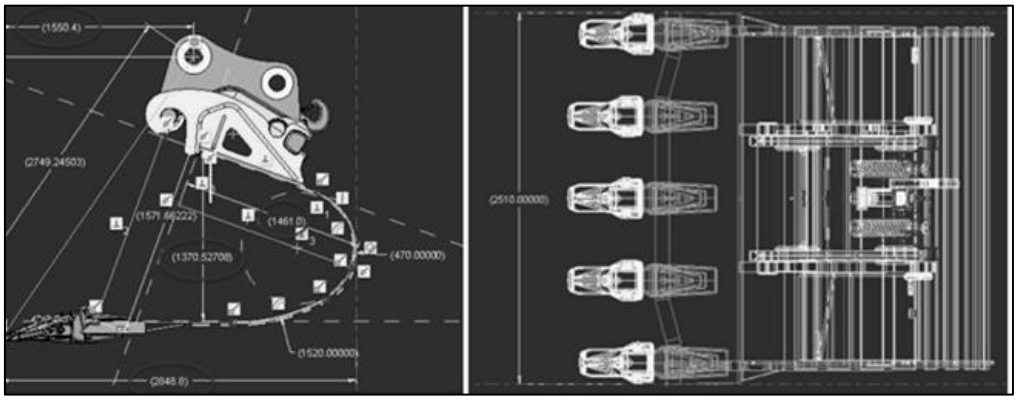
5.2.2 Cenário M1 – Escavadeira com caçamba modificada

Atualmente, a média de passes necessários para carregar o caminhão com a escavadeira hidráulica é de 7 a 9, o que está acima da prática recomendada pela indústria de cerca de 5 passes. Isso indica uma oportunidade para melhorar a eficiência da operação.

No entanto, há um desafio em aumentar a capacidade de escavação da máquina sem comprometer a seletividade, especialmente considerando que a espessura média do minério pode diminuir. Para resolver esse problema, uma solução proposta é aumentar o tamanho da caçamba, mantendo a altura e aumentando a largura. Isso permitiria uma maior produtividade sem afetar a seletividade.

Para implementar essa solução, foi solicitado ao fornecedor que desenvolvesse um novo modelo de caçamba para uma escavadeira de maior capacidade, que é apresentado na figura 17. O modelo desenvolvido, para a escavadeira 395 com peso operacional de 90 toneladas, tem capacidade de caçamba de 6,0 m³ e altura de caçamba de 1,4 m, o que resulta em uma capacidade de carga com apenas 5 passes. A empresa garantiu a manutenibilidade do equipamento, mas testes operacionais serão necessários para confirmar a produtividade prevista.

Figura 17 - Esquema representativo da caçamba modificada desenvolvida para este estudo.



Fonte: Acervo pessoal do autor.

No cenário M1, a frota de equipamentos inclui a escavadeira CAT 395 para escavação, o mesmo modelo de caminhão 46t apresentado no caso base, e o D11 para escarificação. Essas condições foram avaliadas para identificar possíveis melhorias no processo de carregamento, visando aumentar a eficiência e a produtividade da operação.

5.2.3 Cenário M2 – Caminhão 55 t

Considerando que a distância de transporte está em crescimento e que a operação requer o transporte de grandes volumes, é importante estudar a eficiência e produtividade do processo de transporte. Duas soluções foram consideradas para manter a taxa de produção: aumentar o número de equipamentos ou aumentar a capacidade dos equipamentos.

Levando em conta a solução escavadeira com caçamba modificada, faz-se viável aumentar a capacidade de carga do caminho, já que se aumentou a capacidade produtiva e alcance da escavadeira. A opção de aumentar o número de equipamentos poderia aumentar a produtividade, mas também traria custos adicionais, uma frota maior de veículos e maiores riscos operacionais.

Então, para o cenário M2, a frota de equipamentos inclui trator D11 para escarificação, escavadeira CAT 395 com caçamba modificada para carregamento e caminhão 10x4/6 540 Hp com capacidade para transporte de 55 toneladas (Caminhão 55t). Esse equipamento foi testado em campo por um mês e os resultados mostraram que o caminhão foi capaz de transportar o minério de forma eficiente e segura, cumprindo todos os requisitos necessários, a figura 18 traz uma foto deste equipamento em operação.

Figura 18 - Foto do caminhão rodoviário com capacidade de transporte de 55t.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

5.2.4 Cenário M3 – Semirreboque 72 t

Seguindo a mesma linha de raciocínio do cenário anterior, foi adotada a solução de aumentar a capacidade de carga dos equipamentos. Para tal, optou-se pelo caminhão semirreboque com capacidade de carga de 72 toneladas, considerado viável por permitir o aumento da produtividade do processo de transporte sem acarretar custos adicionais.

No cenário M3, além do caminhão semirreboque mencionado acima, incluiu-se um trator D11 para escarificação e uma escavadeira CAT 395 com caçamba modificada para carregamento. Durante um mês, o

caminhão foi testado em campo, sendo identificados pontos positivos e negativos. A figura 19 traz uma foto do equipamento sendo carregado pela escavadeira CAT 375.

Entre os aspectos positivos, destacou-se a maior capacidade volumétrica sem grande perda de potência, o que permitiu ganho de produtividade, culminando em redução no consumo específico de diesel, representando ganho econômico para a empresa.

Entretanto, foram identificados aspectos negativos, como a incapacidade do equipamento em transitar sobre a tira de minério em chuva intensa ou solo saturado, o que pode afetar a produtividade da operação em períodos chuvosos. Além disso, alguns acessos e retornos foram considerados pequenos para a operação do equipamento e a escavadeira 349 não apresentou alcance suficiente para realizar o carregamento, limitando seu uso à CAT 375.

Figura 19 - Foto do Semirreboque com capacidade de transporte de 72t.

Fonte: Acervo pessoal do autor.

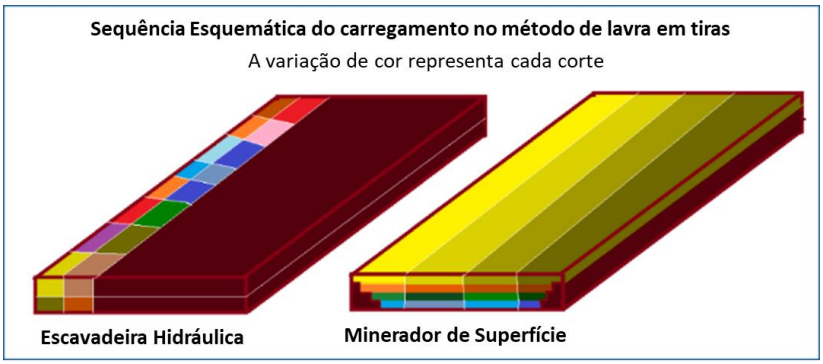
5.2.5 Cenário M4 – Minerador de Superfície

Neste cenário, é considerado o uso do Minerador de Superfície Wirtgen para o desmonte e carregamento dos caminhões. O equipamento Wirtgen Surface Miner é bem estabelecido e já está em operação em outra mina de bauxita no Brasil.

Entretanto, existem certas limitações operacionais que devem ser levadas em consideração. A fim de alcançar altas taxas de produtividade, é essencial operar em faixas com pelo menos 200 metros de comprimento, o que não é viável durante a recuperação de acesso. Além disso, ao realizar cortes sucessivos, a largura do minerador é maior do que a largura do corte, o que resulta em degraus nas laterais da tira sendo lavrada. Esses degraus acumulam material que não foi cortado, exigindo a intervenção de uma escavadeira hidráulica para recuperar o material.

Outra restrição é quanto ao blend do material, já que o corte do minerador de superfície ocorre horizontalmente, enquanto a escavadeira hidráulica realiza o carregamento verticalmente, podendo impactar o blend e controle de variabilidade do minério (veja figura 20).

Figura 20 - Figura esquemática da comparação dos métodos de carregamento do minério: Escavadeira Hidráulica vs. Minerador de Superfície.



Fonte: Autor (2023).

A drenagem da mina também é um desafio operacional do equipamento, pois a operação cria bacias dentro da faixa de minério, exigindo o bombeamento de água durante a estação chuvosa para manter a estabilidade operacional.

Considerando as restrições operacionais apresentadas, o cenário M4 assume que 70% do volume de minério será desmontado e carregado com o minerador de superfície Wirtgen 2500 SM, enquanto os outros 30% serão escarificados com o trator CAT D11 e carregados com a escavadeira hidráulica CAT 395. Para a operação de transporte foi considerado o semirreboque 72t. O uso de equipamentos modernos e eficientes, como o Wirtgen Surface Miner, pode trazer vantagens significativas para a operação de mineração, aumentando a produtividade e reduzindo custos operacionais. A figura 21 traz fotos deste equipamento em operação.

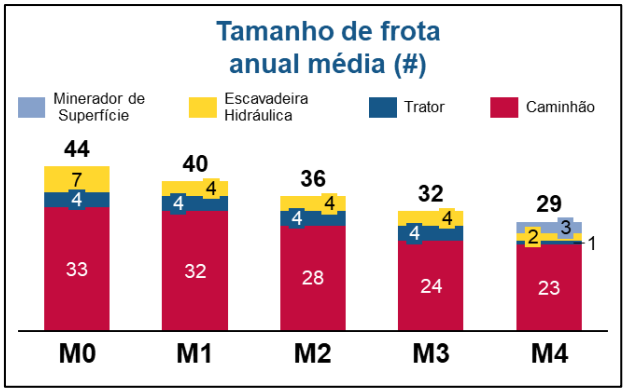
Figura 21 - Foto do minerador de superfície em operação.

Fonte: Wirtgen.

5.2.6 Dimensionamento de Frota e Equipes

Foi realizado um dimensionamento da frota com base em indicadores de produção para todos os cenários, apresentado na figura 22. A partir desses dados, foi possível estimar os custos financeiros de cada cenário e compará-los.

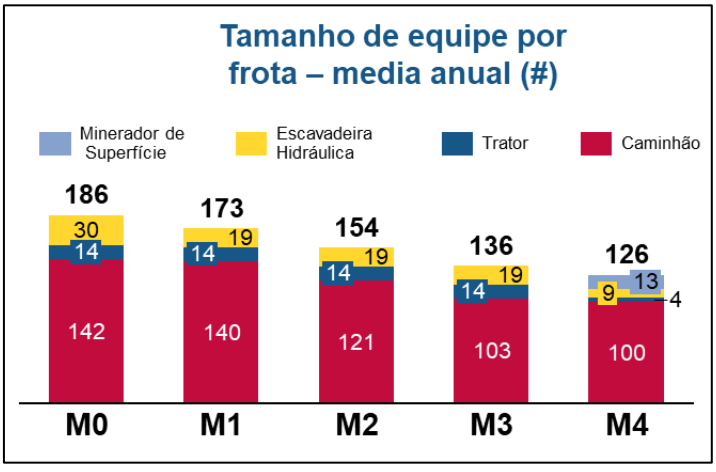
Figura 22 - Tamanhos médios anuais das frotas de cada cenário estudado para a escarificação, carregamento e transporte de minério.



Fonte: Autor (2023).

O dimensionamento de frota reflete-se no dimensionamento da mão de obra operacional. Como mostrado na figura 23 abaixo, o cenário M4 possui a menor frota de equipamentos e consequentemente a menor mão de obra operacional.

Figura 23 - Tamanho das equipes operacionais por frota de cada cenário estudado para escarificação, carregamento e transporte do minério.



Fonte: Autor (2023).

5.3 Cenários – Remoção de Estéril

Foram realizados alguns estudos para a análise dos cenários para a frota de remoção de estéril, assim, os cenários, as discussões operacionais e os resultados financeiros serão apresentados de acordo com o estudo em questão. A figura 24 traz uma foto da remoção de estéril com tratores.

Figura 24 - Foto da remoção de estéril em lavra de Bauxita com tratores CAT-D11.

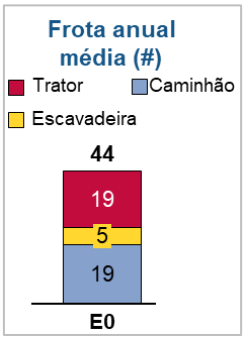
Fonte: Acervo pessoal do autor.

5.3.1 Caso Base (E0)

O Caso Base (E0) se refere à operação atual, conforme apresentado no item 4.4. Nesse caso, o processo de Pushing é realizado por meio de um trator D11 SD, enquanto o rebaixo, que ocorre quando a espessura do estéril é superior a 12 metros, é feito utilizando o conjunto Escavadeira Hidráulica Cat 374 e Caminhão (EH+Caminhão).

Para este cenário, foi realizado o dimensionamento de frota com base em indicadores e dados históricos. A figura 25, a seguir, traz a média anual do tamanho de frota dos equipamentos utilizados no caso base.

Figura 25 – Tamanhos médios anuais das frotas para o caso base de remoção do estéril.



Fonte: Autor (2023).

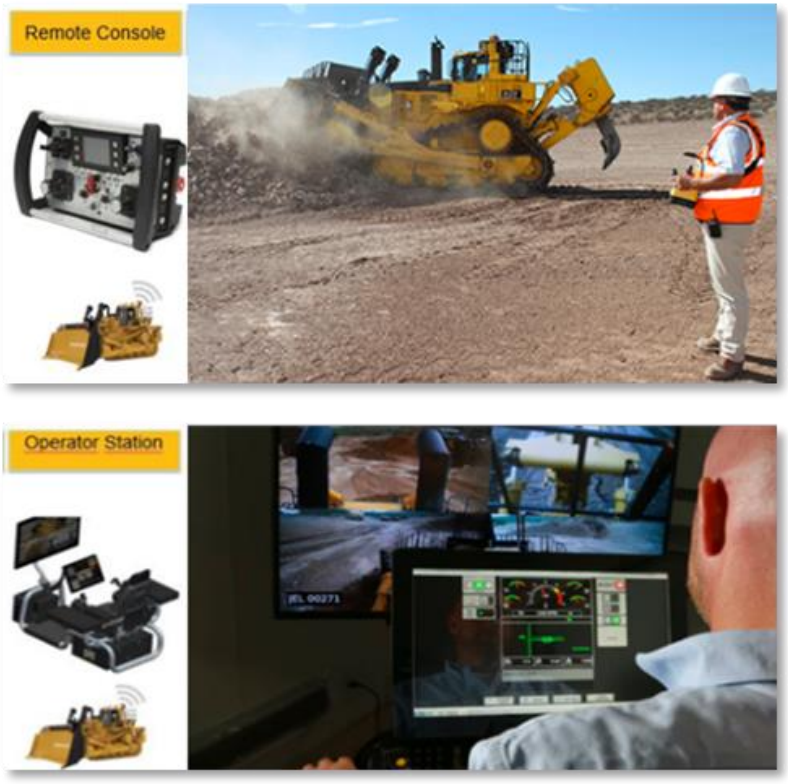
5.3.2 Cenário E1 & E2 – Operação Remota para Tratores

A tecnologia de operação remota de tratores é amplamente utilizada no mercado e oferece uma série de vantagens, incluindo segurança, ergonomia, controle operacional e produtividade. No contexto da remoção de argila em minas de bauxita, essa tecnologia apresenta um benefício significativo em termos de geometria de operação ao retirar o operador de dentro do equipamento, sendo possível assumir ângulos de corte e deposição mais agressivos, reduzindo o ciclo de operação do trator e aumentando consideravelmente a produtividade.

Existem diversas opções no mercado para a operação remota de tratores, mas neste trabalho, serão avaliadas as soluções oferecidas pela empresa Caterpillar, através dos sistemas da linha Command for Dozing. Para analisar os benefícios desses sistemas, foram estabelecidos dois cenários distintos: E1 e E2, cada um utilizando uma solução diferente para a operação remota. A figura 26 traz fotos de ambas as tecnologias.

- **E1 - *Remote Console* –** Permite o controle do equipamento via controle remoto em linha de visada
- **E2 - *Operator Station + Semi-Autonomous Tractor System (SATS)* -** Operação totalmente remota usando uma sala de controle com a operação de múltiplos equipamentos simultaneamente.

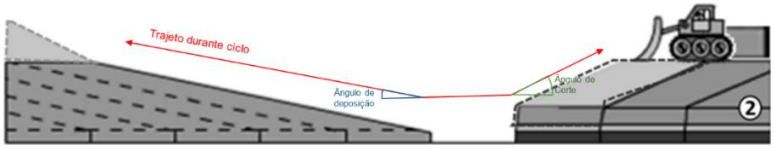
Figura 26 - Tecnologias para operação remota dos tratores CAT-D11.



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Para entender melhor o benefício em termos de geometria da operação, é necessário entender o ciclo de operação do trator nesta atividade, que consiste basicamente em corte e deposição. A figura 27 representa o trajeto percorrido pelo trator. Observa-se que ao alterar o ângulo de corte e deposição consequentemente diminui ou aumenta a distância de transporte do material, impactando sobre o tempo de ciclo e produtividade da operação.

Figura 27 - Esquema representativo das variáveis geométricas na operação de remoção de estéril pelo método de pushing com o trator CAT-D11.

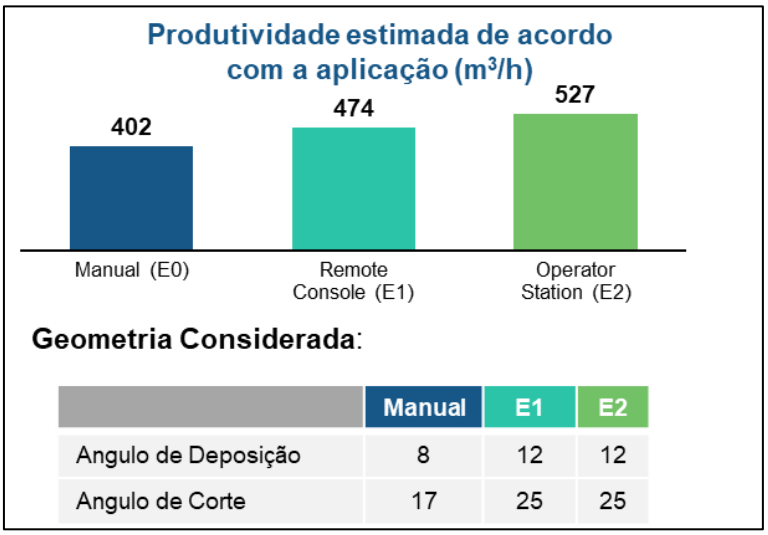


Fonte: Acervo pessoal do autor.

A operação remota permite tirar restrições ergométricas da operação, limitando apenas as questões operacionais. De acordo com o fornecedor do equipamento, é recomendado que o equipamento seja operado com um ângulo máximo de corte de 25 graus e um ângulo máximo de deposição de 12 graus, levando em

consideração a intensidade da atividade em questão. Essa operação não deve comprometer a manutenção do equipamento, o que significa que não serão adicionados custos extras de manutenção. Foi feita uma simulação da produtividade do D11 no software DOZSIM da Caterpillar, considerando a aplicação de ângulos de corte e deposição de acordo com essa orientação. Os resultados da simulação podem ser vistos na figura 28.

Figura 28 – Premissas de produtividade utilizadas para cada tecnologia para operação dos tratores e as geometrias consideradas para seu cálculo.



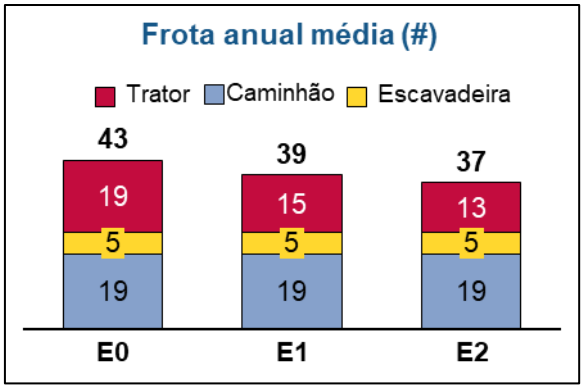
Geometria Considerada:

	Manual	E1	E2
Angulo de Deposição	8	12	12
Angulo de Corte	17	25	25

Fonte: Autor (2023).

Destaca-se a diferença de produtividade entre os cenários E1 e E2, que não está relacionada à geometria da operação. Isso ocorre devido à consideração de que há mais tecnologia embarcada na operação semi-autônoma, portanto, um fator de correção da produtividade devido maior precisão foi assumido. Com base nessas produtividades, foi realizada um dimensionamento da frota e as informações principais são apresentadas na figura 29.

Figura 29 - Tamanhos médios anuais das frotas para os cenários de operação remota dos tratores D11.



Fonte: Autor (2023).

5.3.3 Cenário E3 – Sistema Scraper

A utilização de Scraper para remoção de estéril em minas de bauxita na Amazônia é bem estabelecida pela indústria. Com o avanço tecnológico, a aplicação desses sistemas pode se tornar ainda mais viável. Este estudo se concentra no sistema Scraper John Deere, que foi implementado recentemente em operações semelhantes e tem alcançado boa performance e baixos custos.

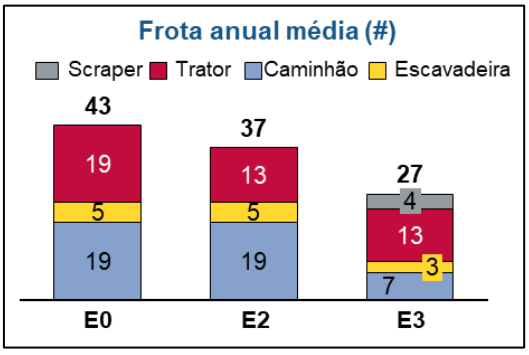
Dadas as restrições operacionais do scraper e as especificidades da operação em estudo, foi concluído que a melhor aplicação seria na atividade de rebaixo, que possui um custo unitário maior do que a atividade de *pushing*. Além disso, apesar de alcançar bons níveis de produtividade, é difícil utilizar mais de um equipamento na mesma área, ao contrário dos tratores D11, o que afetaria a continuidade da lavra.

O Scraper System John Deere foi testado na operação e alcançou bons resultados de produtividade. Esses resultados foram considerados como premissa para o desenvolvimento do cenário E3. É importante ressaltar que, apesar de ter dificuldades em operar durante a estação chuvosa, a UT do Scraper é considerada a mesma que a da EH+Caminhão, já que ambas as operações não ocorrem sob chuva.

Como mencionado, o sistema Scraper não substitui completamente as escavadeiras e os caminhões, logo assumiu-se que 70% do volume seria removido pelo Scraper e 30% pelo conjunto EH+Caminhão. Além disso, custo de serviços auxiliares está incluído na estimativa em cima de 30% das horas anuais do Scraper, pois é necessário preparar a área para a operação do equipamento. Esse fator foi assumido de forma conservadora baseado no teste de campo.

Considerando todos esses fatores, foi realizado o dimensionamento de frota e para o cenário E3. As informações principais são apresentadas na figura 30, comparadas ao caso base.

Figura 30 - Tamanhos médios anuais das frotas comparando o caso base, operator station e rebaixo com sistema scraper.

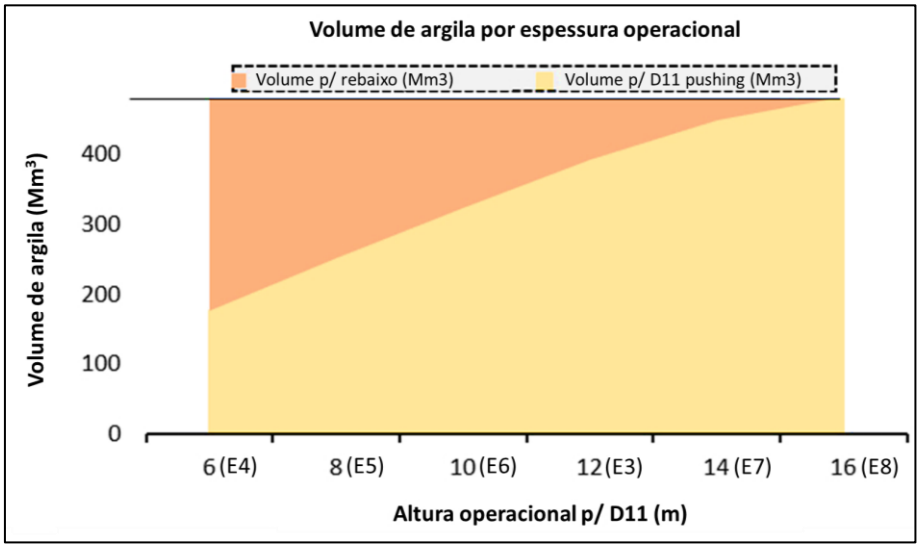


Fonte: Autor (2023).

5.3.4 Cenário E4 a E8 – Altura Operacional dos Tratores

A remoção da argila é composta por duas etapas, o rebaixo e o *pushing*. Espera-se que mude a relação entre essas atividades, uma vez que os custos de rebaixo foram alterados. Atualmente, o rebaixo é realizado em áreas onde a espessura da camada de estéril excede 12 metros. No entanto, os cenários E4 a E9 estão explorando diferentes espessuras operacionais para operação do D11 a fim de otimizar o processo de remoção de estéril. A figura 31 abaixo mostra como ficaria a distribuição da argila para cada atividade de acordo com a altura operacional adotada para a operação de pushing com D11.

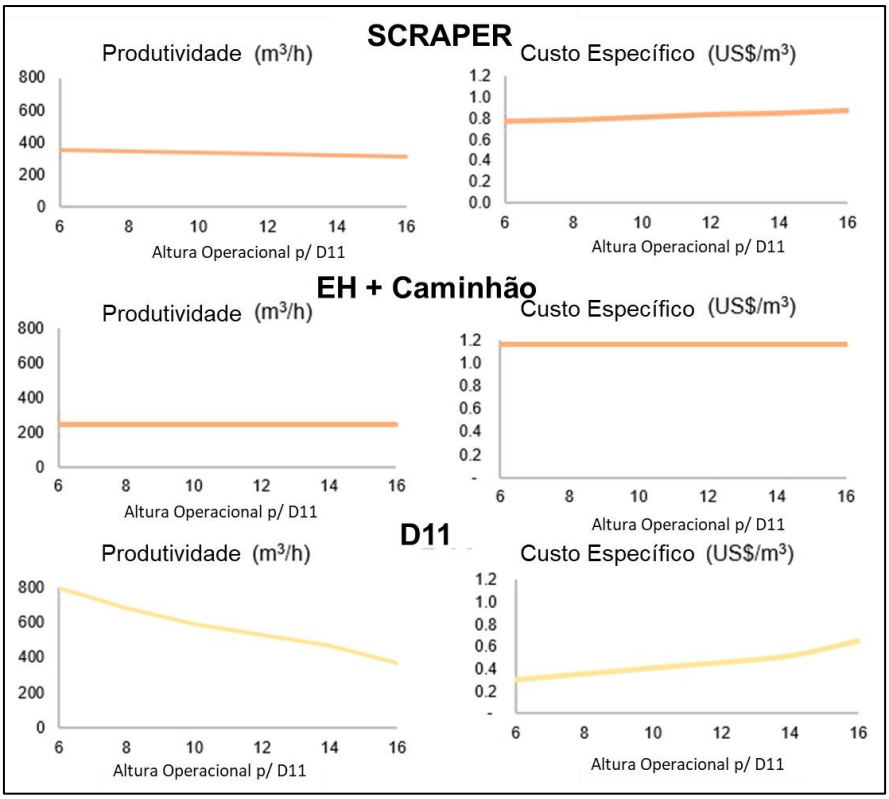
Figura 31 - Distribuição da argila por atividade em operação de pushing com d11 em diferentes alturas operacionais



Fonte: Autor (2023).

Ao modificar a altura de trabalho dos tratores, ocorre uma mudança na produtividade, uma vez que o tempo de ciclo de operação dos tratores é afetado. Essa relação é inversamente proporcional, o que significa que a redução da altura operacional resulta em aumento da produtividade. Isso também se reflete nas operações de rebaixamento, embora em menor escala. A figura 32 ilustra a relação entre a altura operacional e a produtividade para cada operação, bem como o impacto resultante sobre o custo específico.

Figura 32 - Relação entre Altura operacional do D11, Produtividade e Custo Específico por Operação Unitária para Remoção de Estéril



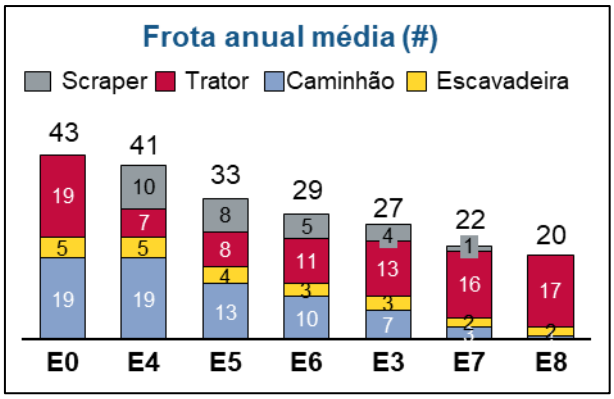
Fonte: Autor (2023).

Ao relacionar essas três variáveis, produtividade, custo específico e volume removido por cada atividade, alcança-se o custo total de remoção de estéril. Visando encontrar o menor custo total os seguintes cenários foram desenvolvidos:

- Cenário E3 – D11 *Operator Station* & Scraper para rebaixo acima de 12m
- Cenário E4 - D11 *Operator Station* & Scraper para rebaixo acima de 6m
- Cenário E5 - D11 *Operator Station* & Scraper para rebaixo acima de 8m
- Cenário E6 - D11 *Operator Station* & Scraper para rebaixo acima de 10m
- Cenário E7 - D11 *Operator Station* & Scraper para rebaixo acima de 14m
- Cenário E8 - D11 *Operator Station* & EH+Caminhão acima de 16m

Novamente a produtividade dos tratores foi calculada através do software DOZSIM, e a frota foi dimensionada e os custos foram modelados para cada cenário. O dimensionamento está demonstrado na figura 33 a seguir.

Figura 33 - Tamanhos médios anuais das frotas para os cenários analisando o impacto da variação da altura operacional do D11.



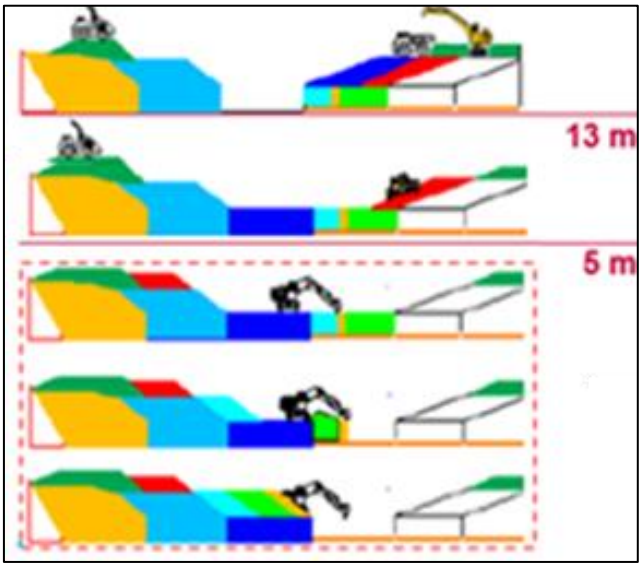
Fonte: Autor (2023).

5.3.5 Cenário E9 – Escavadeira de grande porte

Outro método operacional adotado em minas de bauxita na Amazonia é a utilização de uma escavadeira de grande porte que remove os primeiros 5 metros de argila e a deposita apenas balançando o balde, não requerendo caminhões. Como uma escavadeira de grande porte, ela traz grande produtividade para o sistema.

Nesse processo, emprega-se o conjunto EH+Caminhão para retirar o material acima de 13 metros. Para as camadas com espessura entre 5 e 13 metros, o material é removido pelo trator D11, que atua em uma faixa operacional de 8 metros de altura. Já para os últimos 5 metros, utiliza-se uma escavadeira de grande porte, pesando 250 toneladas e equipada com uma caçamba de 18m³ e alcance de 15m. Para fins deste estudo, adotou-se a Liehberr R9250 como modelo de escavadeira. Este sistema é representado na figura 34 abaixo.

Figura 34 - Esquema representativo das etapas para remoção de estéril utilizando de escavadeira de grande porte.



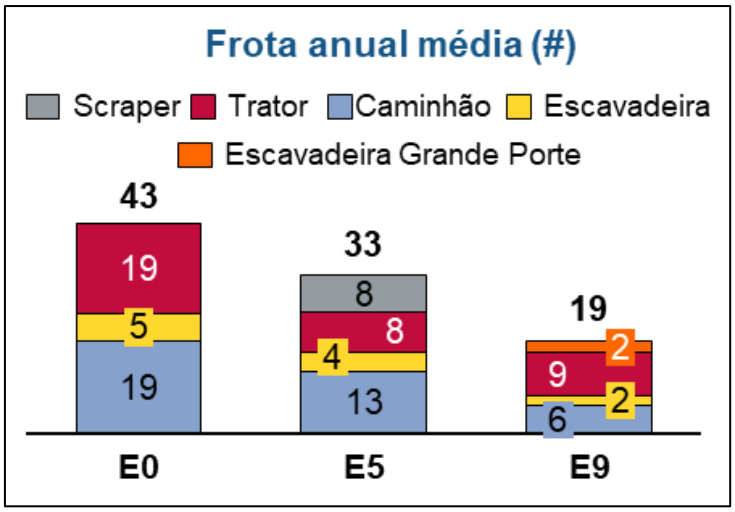
Fonte: Acervo pessoal do autor.

Inicialmente, a R9250 remove 25% do material e o deposita na próxima faixa de mineração, com o objetivo de criar uma barreira que evite a entrada de água na área operacional. Os outros 75% do material são depositados na faixa já explorada, sem necessidade de serviços auxiliares (conforme figura 37). A altura máxima do banco é de 5 metros, uma vez que acima desse limite, a escavadeira movimenta uma quantidade significativa de material, causando instabilidade no estoque formado. Além disso, outro parâmetro técnico que deve ser levado em conta é a pressão sobre o solo. Nessa operação, a escavadeira excede esse limite, mas é possível mitigar o problema aumentando a largura da sapata operacional.

Devido à redução do volume de rebaixo com este método, considera-se a utilização do conjunto EH+caminhão para essa atividade, uma vez que esse conjunto proporciona maior flexibilidade nas operações. É importante destacar que é considerado custo de equipamento auxiliar na estimativa em cima de 15% das horas anuais da escavadeira, já que o mesmo seria necessário para remodelar a área após a operação da escavadeira.

Vale ressaltar que o alcance da escavadeira se aplica a uma largura máxima de faixa de 25 metros, considerando as três etapas da operação. Além disso, uma característica relevante dessa máquina é a sua robustez e alta produtividade, sendo que sua vida útil é de 60.000 horas. A produtividade da Escavadeira de grande porte foi fornecida pelo fabricante e, com base nessas informações, foi realizado o dimensionamento da frota para o cenário E9, apresentado na figura 35.

Figura 35 - Tamanhos médios anuais das frotas comparando o caso base, o melhor cenário obtido na análise de altura operacional do D11 e o cenário considerando a aplicação de escavadeira de grande porte.



Fonte: Autor (2023).

5.3.6 Cenário E10 – Dragline

A Dragline é uma tecnologia estabelecida na indústria de mineração a céu aberto, com baixos custos operacionais e alta durabilidade, podendo chegar a até 100.000 horas de vida útil. Sua robustez e alta produtividade a tornam uma opção ideal para movimentação de grandes volumes de material. Recentemente, melhorias foram implementadas no modelo Dragline, permitindo o uso de braços maiores sem afetar significativamente a capacidade da caçamba, aumentando assim a estabilidade da máquina.

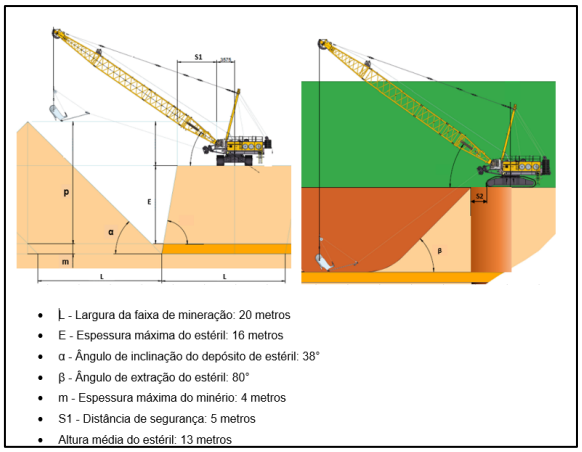
Para uma avaliação completa, é importante levar em consideração outras informações relevantes. A Dragline só pode ser utilizada na camada de argila do estéril, já que não possui a força necessária para escavar a camada de laterita. Caso a altura do estéril seja superior a 16 metros, é necessário o uso de um equipamento auxiliar para mover o material acima desse limite.

Outra vantagem da Dragline é seu bom desempenho durante a estação chuvosa. Além disso, seu baixo consumo de diesel contribui para a redução de emissões de gases poluentes e para o aumento da eficiência operacional na mina. Por fim, é importante destacar que a Dragline permite a disposição direta do material na área de depósito, sem a necessidade de caminhões.

A produtividade deste equipamento depende da geometria de operação e das características do material que está sendo movimentado, sendo que essas informações foram calculadas e fornecidas pelo fornecedor. As principais suposições operacionais para o cálculo da produtividade estão ilustradas na figura 36. Além disso, um aspecto importante a se considerar é a capacidade da caçamba, que neste projeto foi projetada

com uma borda lateral que pode ser ajustada para variar a capacidade entre 9,2 e 10,7 metros cúbicos, proporcionando maior flexibilidade para a operação da Dragline em diferentes alturas de estéril.

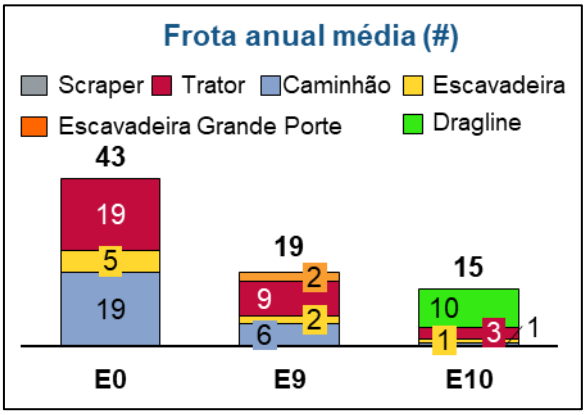
Figura 36 - Esquema representativo das varíaveis geométricas na operação da dragline, e os valores adotados neste estudo.



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Foi avaliado o modelo HS 8300.2, que é o mais novo modelo da Dragline disponível com diversas melhorias, principalmente relacionadas à estabilidade e flexibilidade do equipamento. A Dragline é produzida e vendida pela Liebherr, uma empresa estabelecida na indústria de mineração. Foi realizada um dimensionamento da frota os valores são apresentados na figura 37.

Figura 37 - Tamanhos médios anuais das frotas comparando o caso base, a aplicação de escavadeira de grande porte e cenário utilizando dragline.



Fonte: Autor (2023).

5.4 Modelagem de Custos e Avaliação Financeira

Através do dimensionamento de frota para os cenários apresentados e considerando as premissas de custos, foram gerados modelos financeiros para comparar os custos em cada cenário. E, para as análises financeiras e determinar a melhor opção de investimento, considera-se a técnica de análise de Valor Presente Líquido (VPL). O VPL considera o valor atual de um investimento, levando em conta o fluxo de caixa esperado durante a sua vida útil.

Como neste estudo estamos comparando diferentes custos, a comparação será realizada em cima do VPL de redução de custos, ou seja, o valor presente líquido da economia gerada pela redução de custos em cada uma das alternativas estudadas. Ao calcular o VPL da redução de custos em cada uma das alternativas, é possível identificar qual delas apresenta a melhor relação custo-benefício e, consequentemente, escolher a opção mais vantajosa.

Neste trabalho serão apresentados três grandes valores amplamente utilizados na indústria para descrever diferentes tipos de despesas: Capex, Sustaining e Opex. Os gastos de Capex referem-se aos investimentos realizados em bens duráveis, como equipamentos, propriedades, instalações e tecnologias, relacionados ao ano zero do projeto. Por sua vez, os gastos de Sustaining mencionados neste trabalho incluem o Capex necessário para manter o cenário após o ano zero, como a reposição de equipamentos ou a construção de obras civis devido ao aumento de mão de obra. Por fim, as despesas operacionais, ou Opex, são os custos recorrentes necessários para manter as atividades diárias da empresa em funcionamento, tais como salários, diesel, consumíveis e manutenção.

No que diz respeito à apresentação dos resultados financeiros neste trabalho, é fundamental destacar que eles serão ajustados para preservar a confidencialidade dos dados e, portanto, não serão apresentados como valores absolutos. Para isso, primeiramente, será calculado o desvio padrão dos resultados alcançados para cada custo sendo apresentado. E, com esses valores, será escolhido o fator de normalização como o maior desvio padrão encontrado, excluindo-se o Caso Base. Ao normalizar os dados pelo desvio padrão, estamos colocando todos os valores em uma mesma escala relativa, onde o valor 1 corresponde a uma variação igual ao desvio padrão dos dados. Isso é útil porque o desvio padrão é uma medida que pode ser interpretada em relação aos próprios dados, permitindo uma comparação relativa entre as variáveis.

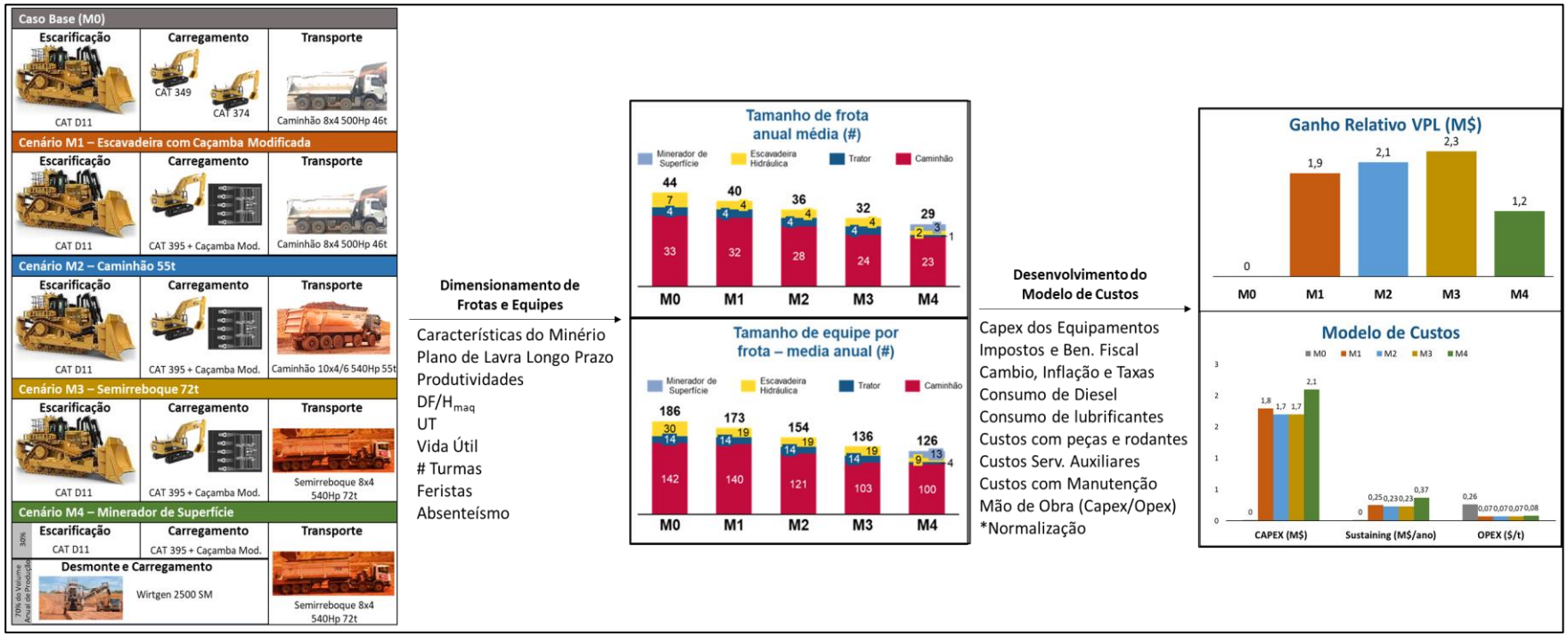
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os resultados das análises conduzidas nos variados cenários delineados na seção anterior são apresentados, onde considera-se não apenas critérios financeiros, mas também questões operacionais, como flexibilidade e seletividade, entre outros.

6.1 Carregamento e Transporte de Minério

A Figura 38 apresenta um fluxograma das análises conduzidas, acompanhado por gráficos que destacam os dimensionamentos realizados e os resultados financeiros obtidos.

Figura 38 – Fluxograma das análises propostas e resultados obtidos para carregamento e transporte de minério.



Fonte: Autor (2023)

Ao analisar os dimensionamentos, nota-se que a utilização da caçamba modificada na escavadeira hidráulica também afeta a eficiência do transporte, como observa-se ao comparar cenário M1 e M0, diminui a frota de caminhões em um equipamento. Contudo, reforça-se, que é imprescindível realizar um teste operacional para atestar a real efetividade da solução, assim como questões de mantenabilidade, e por consequência as premissas de custos adotadas.

No entanto, já que há diversos custos e variáveis no modelo financeiro, não necessariamente a menor frota trará o menor custo. Como podemos observar na tabela 3 abaixo, o cenário M3 traz o maior benefício financeiro.

Tabela 3 - Resultados financeiros para os cenários avaliados para a escarificação, carregamento e transporte de minério.

Cenários		**Ganho Relativo VPL (M$)**	**CAPEX (M$)**	**Sustaining (M$/ano)**	**OPEX ($/t)**
M0	Caso Base				0.26
M1	EH com caçamba modificada	**1.9**	1.8	0.25	0.07
M2	Caminhão 55t	**2.1**	1.7	0.23	0.07
M3	Semirreboque 72t	**2.3**	1.7	0.23	0.07
M4	Minerador de Superfície	**1.2**	2.1	0.37	0.08

Fonte: Autor (2023).

Conforme mencionado previamente, é importante destacar que os resultados financeiros apresentados neste trabalho foram ajustados para preservar a confidencialidade dos dados e, portanto, não são apresentados como valores absolutos. Em vez disso, os dados foram normalizados usando o desvio padrão como referência, o que permite uma comparação relativa entre as variáveis.

Observa-se que os valores de custos operacionais do M0 são significativamente mais alto em comparação aos demais cenários. Isso se deve ao modelo operacional terceirizado adotado atualmente, que não envolve investimentos em capital, levando à classificação de todos os custos como custos operacionais. Além disso, pode-se concluir que o Capex dos equipamentos é repassado em cima do OPEX, o que aumenta ainda mais o valor dos custos operacionais. É fundamental avaliar a contribuição do ganho de primarização para as discussões e análises financeiras.

Conforme evidenciado pelo cenário M2 ao ser o segundo melhor resultado financeiro, conclui-se que aumentar a capacidade de carga da frota de caminhões oferece vantagens significativas.

Apesar de o cenário M3 apresentar valores próximos de CAPEX, Sustaining e OPEX em comparação com os demais, ele sempre tem o menor custo, reforçando sua vantagem em termos de custo-benefício e tornando-se a opção mais viável e vantajosa.

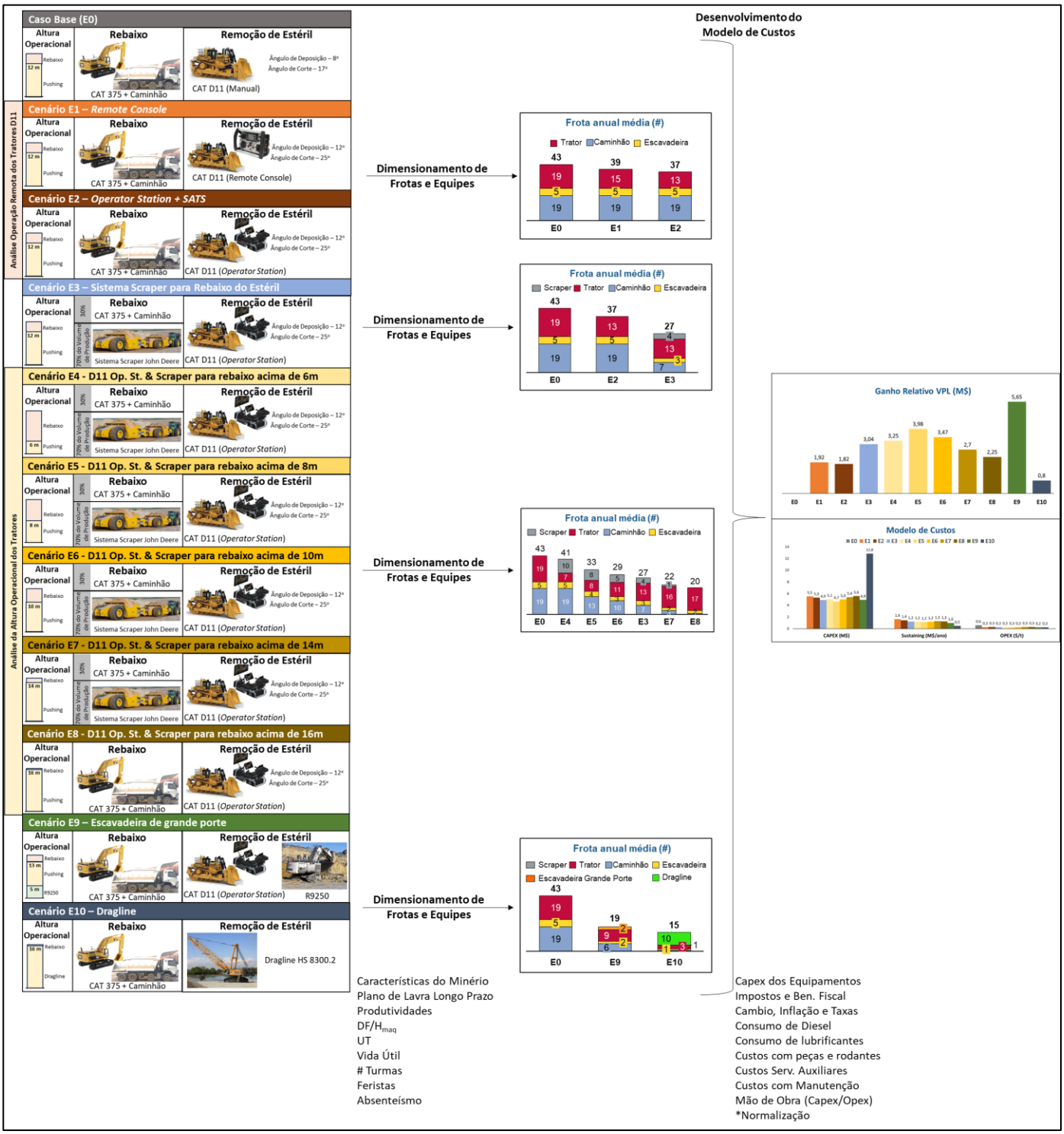
Mesmo com algumas limitações operacionais, como restrições de geometria da mina, blending e drenagem, o cenário M4 permanece com potencial financeiro viável para o minerador de superfície.

Pode-se enfatizar que a adoção de uma frota composta por equipamentos de carga e transporte de maior porte, conforme descrito no cenário M3, apresenta vantagens financeiras significativas. Além disso, a necessidade de modificar os equipamentos de carga para atender às especificidades da operação em questão ressalta a importância de encontrar soluções personalizadas para cada desafio e realidade.

6.2 Remoção de Estéril

Uma vez que este trabalho contempla a aplicação de quatro análises distintas para avaliar as estratégias propostas na remoção do estéril, os resultados serão apresentados de forma segmentada, correspondendo a cada análise específica, antes de serem consolidados, proporcionando uma comparação abrangente entre os diferentes cenários. Para simplificar a compreensão, a Figura 39 oferece um fluxograma que ilustra as análises realizadas, complementado por gráficos que destacam os dimensionamentos realizados e os resultados financeiros obtidos..

Figura 39 – Fluxograma das análises propostas e resultados obtidos para remoção do estéril.



Fonte: Autor (2023).

6.2.1 Análise Operação Remota dos Tratores D11

Na avaliação das alternativas de operação remota dos tratores D11, os resultados financeiros derivados da modelagem financeira são detalhados na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Resultados financeiros para a Análise de Operação Remota dos Tratores D11

Cenários	Ganho Relativo VPL (M$)	CAPEX (M$)	Sustaining (M$/ano)	OPEX ($/t)
E0				0.59
E1	**1.92**	5.53	1.63	0.28
E2	**1.82**	5.32	1.44	0.29

Fonte: Autor (2023).

Embora a implementação do *Remote Console* (E1) possa trazer maiores benefícios financeiros, é essencial investigar com mais profundidade os aspectos ergonômicos, uma vez que o fato dos operadores estarem em linha de visada pode gerar riscos e dificuldades operacionais. Além disso, é importante ressaltar que a infraestrutura de rede requerida para o *Operator Station* é fundamental para a implementação do cenário E2. No entanto, esse custo não está sendo considerado neste estudo, uma vez que está além do escopo do trabalho.

No que diz respeito a ganhos financeiros, ao compararmos os valores, percebemos que o cenário E1 apresenta o maior ganho relativo, embora a diferença em relação ao E2 seja relativamente pequena. Logo, tendo em vista a tendência do mercado em relação à operação autônoma de equipamentos móveis, juntamente com todos os benefícios operacionais que essa tecnologia oferece, podemos concluir que o cenário E2 é considerado o melhor nesta análise.

Além disso, é importante notar que existem benefícios não quantificados, relacionados à diminuição da pegada ambiental. Esse processo permite a movimentação eficiente do estéril, reduzindo as emissões de gases poluentes resultantes da combustão de combustíveis.

6.2.2 Alternativa para rebaixo – Sistema Scraper

Explorando o cenário E3, que integra o sistema scraper John Deere para a execução do rebaixo, nossa análise se concentra em encontrar alternativas para essa atividade, que se destaca como a mais onerosa na remoção de estéril. Os resultados financeiros dessa análise estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados financeiros para a análise de tecnologia para rebaixo (EH+Caminhão vs. Scraper)

Cenários	Ganho Relativo VPL (M$)	CAPEX (M$)	Sustaining (M$/ano)	OPEX ($/t)
E0				0.59
E2	**1.82**	5.32	1.44	0.29
E3	**3.04**	4.91	1.23	0.28

Fonte: Autor (2023).

Com base na análise financeira dos cenários E2 e E3, pode-se concluir que E3 é 67% mais benéfico que E2. Além disso, mesmo com a adição de uma nova etapa ao processo, a implementação do sistema scraper resultaria em uma redução do tamanho da frota de equipamentos para estéril devido ao seu baixo custo operacional.

Levando em consideração os aspectos operacionais ao analisar os cenários E0, E2 e E3, torna-se evidente que o conjunto EH+Caminhão oferece uma notável flexibilidade operacional. Contudo, é válido destacar que as limitações inerentes ao Sistema Scraper não o tornam inoperante, ao contrário, os testes de campo demonstraram taxas de produtividade satisfatórias. A proposição de integrar o Sistema Scraper ao conjunto EH+Caminhão, contornaria essas questões, viabilizando o cenário E3. Além disso, é importante salientar que os impactos resultantes da inoperância durante chuvas afetam ambas as tecnologias comparadas de maneira similar. Portanto, ambas apresentariam níveis de utilização idênticos.

Logo, considerando todos esses fatores, é possível concluir que o cenário E3, que inclui o uso do sistema scraper para rebaixo, é considerado o melhor nesta análise.

6.2.3 Análise da Altura Operacional dos Tratores

Os cenários E4 a E9 avaliam o impacto de alterar a atura operacional do D11 sobre os aspectos operacionais e financeiros. A tabela 6 traz os resultados financeiros obtidos.

Tabela 6 - Resultados financeiros para a análise da altura operacional do D11.

Cenários	Ganho Relativo VPL (M$)	CAPEX (M$)	Sustaining (M$/ano)	OPEX ($/t)
E0				0.59
E3	**3.04**	4.91	1.23	0.28
E4	**3.25**	5.05	1.21	0.26
E5	**3.98**	4.67	1.14	0.26
E6	**3.47**	5.00	1.19	0.26
E7	**2.70**	5.40	1.29	0.29
E8	**2.25**	5.58	1.26	0.29

Fonte: Autor (2023).

Podemos observar que os diferentes cenários apresentam variações significativas em termos de custos e benefícios. Além disso, podemos observar que o cenário E5 apresentou o maior ganho relativo VPL sobre o cenário E0, já que apresentou o menor CAPEX, Sustaining e OPEX, indicando que é o cenário mais eficiente do ponto de vista financeiro. Portanto, concluímos que o cenário E5, em que o trator opera nas áreas abaixo de 8 metros de espessura, é o melhor cenário para o processo de remoção de estéril. Ele apresenta o maior benefício financeiro e, portanto, seria a escolha mais adequada para otimizar o processo de remoção de argila.

6.2.4 Escavadeira de Grande Porte e Dragline

Visando explorar outras metodologias, os cenários E9 e E10 foram propostos. A tabela 7 traz os resultados financeiros obtidos.

Tabela 7 - Resultados financeiros e comparação do caso base, o melhor cenário obtido na análise de altura operacional do D11 e o cenário considerando a aplicação de escavadeira de grande porte.

Cenários	Ganho Relativo VPL (M$)	CAPEX (M$)	Sustaining (M$/ano)	OPEX ($/t)
E0				0.59
E5	**3.98**	4.67	1.14	0.26
E9	**5.65**	4.92	0.97	0.23
E10	**0.80**	12.8	0.48	0.25

Fonte: Autor (2023).

É notável que a incorporação da escavadeira de grande porte traz consigo significativos benefícios financeiros, culminando em um aumento de 42% no lucro relativo em relação ao cenário E5, além de exibir um OPEX 12% inferior. A partir dessas informações, pode-se inferir que o método examinado e proposto no cenário E9 se destaca como o mais eficaz em termos de lucratividade, emergindo como a opção mais eficaz e economicamente vantajosa para a remoção de estéril.

No âmbito das operações, é evidente que a inclusão da escavadeira de grande porte para a movimentação dos últimos 5 metros de estéril não acarretaria em impactos significativos. Esta escolha baseia-se na alta produtividade desse equipamento, o que implica que sua integração não afetaria a continuidade das operações unitárias. Além disso, ao optar pela combinação EH+Caminhão para a atividade de rebaixo, é possível manter a valiosa flexibilidade que esse conjunto oferece às operações. Isso, por sua vez, sustenta as atividades relacionadas à infraestrutura da mina, reforçando a eficácia global das operações.

No que concerne ao cenário E10, embora ele não apresente ganhos financeiros substanciais, é crucial destacar que a longevidade do equipamento exerce impacto sobre essa análise, uma vez que sua vida útil estende-se por 17 anos, enquanto a avaliação abrange apenas 13 anos. Além disso, o plano de mineração de longo prazo empregado para o cálculo enfrenta notáveis variações no volume de estéril, acarretando em consideráveis custos de investimento sustentável. Para uma avaliação mais precisa, seria imperativo elaborar um plano de lavra específico, contemplando a implementação da Dragline. Isso possibilitaria uma análise mais acurada da solução. Todavia, é relevante salientar que, em diálogo com um consultor amplamente reconhecido internacionalmente, questionamentos foram levantados sobre as suposições operacionais, sendo recomendada uma reavaliação das mesmas.

Conclui-se que, a opção mais economicamente vantajosa para a remoção do estéril é o cenário E9, que incorpora a utilização de uma escavadeira de grande porte. Embora a dragline apresente vantagens em termos de durabilidade, consumo de diesel reduzido e custos operacionais mais baixos, o cenário E10, no entanto, não se revelou atrativo sob a perspectiva financeira.

6.2.5 Avaliação financeira e discussões

Ao consolidar todos os estudos desenvolvidos para a operação do estéril podemos concluir que o cenário E9 é a mais vantajosa não só financeiramente, mas também levando em conta aspectos operacionais. Importante ressaltar que este cenário considera a operação remota dos tratores D11 com operator station + SASTs, o que se mostrou ser uma ótima opção para a atividade de pushing. A tabela 9 apresentada traz todos os resultados obtidos consolidado.

Tabela 8 - Comparação financeira dos diferentes cenários para operação de remoção do estéril.

Cenários		Ganho Relativo VPL (M$)	CAPEX (M$)	Sustaining (M$/ano)	OPEX ($/t)
E0	**Caso Base**				0.59
E1	**D11 *Remote Console* & HE (12m)**	**1.92**	5.53	1.63	0.28
E2	**D11 *Operator Station* & EH (12m)**	**1.82**	5.32	1.44	0.29
E3	***Operator Station* & Scraper (12m)**	**3.04**	4.91	1.23	0.28
E4	***Operator Station* & Scraper (6m)**	**3.25**	5.05	1.21	0.26
E5	***Operator Station* & Scraper (8m)**	**3.98**	4.67	1.14	0.26
E6	***Operator Station* & Scraper (10m)**	**3.47**	5.00	1.19	0.26
E7	***Operator Station* & Scraper (14m)**	**2.70**	5.40	1.29	0.29
E8	***Operator Station* & HE (16m)**	**2.25**	5.58	1.26	0.29
E9	**Escavadeira Grande Porte**	**5.65**	4.92	0.97	0.23
E10	**Dragline**	**0.80**	12.83	0.48	0.25

Fonte: Autor (2023).

As linhas destacadas em claro significam que esse cenário é a melhor opção em suas respectivas análises, no entanto, não é o melhor resultado para remoção de sobrecarga, sendo este o cenário E9, destacado em escuro.

7 CONCLUSÕES

O avanço contínuo da lavra revelou um aumento na proporção estéril/minério, no volume de estéril, na distância de transporte do minério e na redução da espessura do minério. Essas mudanças impactaram diretamente os custos e afetaram a estabilidade operacional. Nesse contexto, este estudo buscou alternativas viáveis para aumentar a eficiência da operação de lavra e mitigar a tendência de aumento dos custos.

A análise foi estruturada em duas abordagens principais: alternativas para o carregamento e transporte de minério, bem como opções para a remoção de estéril. Os resultados apresentados na Tabela 10 claramente indicam que as metodologias propostas tiveram um impacto substancial na redução dos custos de lavra na mina de bauxita em Juruti. Estes resultados deixam claro que as alternativas propostas possuem vantagens financeiras significativas em comparação com os métodos atuais de operação de lavra.

Tabela 9 - Resultados de Custos e Ganho Relativo das Alternativas Propostas para a Operação de Lavra da Mina de Bauxita em Juruti

Cenários			Ganho relativo VPL (M$)	CAPEX (M$)	Sustaining (M$/year)	OPEX ($/t)
Minério	**M0**	**Caso Base**				0.26
	M1	**EH com caçamba modificada**	**1.87**	1.83	0.25	0.07
	M2	**Caminhão 55t**	**2.09**	1.74	0.23	0.07
	M3	**Semirreboque 72t**	**2.28**	1.68	0.23	0.07
	M4	**Minerador de Superfície**	**1.24**	2.15	0.37	0.08
Estéril	**E0**	**Caso Base**				0.59
	E1	**D11 *Remote Console* & HE (12m)**	**1.92**	5.53	1.63	0.28
	E2	**D11 *Operator Station* & EH (12m)**	**1.82**	5.32	1.44	0.29
	E3	***Operator Station* & Scraper (12m)**	**3.04**	4.91	1.23	0.28
	E4	***Operator Station* & Scraper (6m)**	**3.25**	5.05	1.21	0.26
	E5	***Operator Station* & Scraper (8m)**	**3.98**	4.67	1.14	0.26
	E6	***Operator Station* & Scraper (10m)**	**3.47**	5.00	1.19	0.26
	E7	***Operator Station* & Scraper (14m)**	**2.70**	5.40	1.29	0.29
	E8	***Operator Station* & HE (16m)**	**2.25**	5.58	1.26	0.29
	E9	**Escavadeira Grande Porte**	**5.65**	4.92	0.97	0.23
	E10	**Dragline**	**0.80**	12.83	0.48	0.25

Fonte: Autor (2023).

Uma análise mais aprofundada dos dois cenários mais promissores para o carregamento e transporte de minério, bem como a remoção de estéril, demonstrou um potencial de ganhos substanciais, resultando em uma notável redução de 65% nos custos operacionais. Embora as alternativas para o carregamento e transporte de minério apresentem benefícios notáveis, os resultados ressaltam ainda mais o potencial de redução de custos na remoção de estéril, com um aumento de 150% em relação ao minério. Isso enfatiza a viabilidade e eficácia das alternativas propostas em significativamente aprimorar a operação de lavra na mina de bauxita em Juruti.

Além dos resultados financeiros já discutidos, é recomendável explorar a avaliação dos benefícios financeiros desconsiderando os ganhos provenientes do modelo operacional, para uma compreensão mais precisa dos custos.

Em resposta às preocupações globais sobre emissões de carbono, é sugerido que futuros estudos considerem a viabilidade de veículos e equipamentos elétricos na operação de lavra. A transição para equipamentos elétricos, reduzindo emissões e custos operacionais, alinha-se com esforços de mineração sustentável.

Além disso, alternativas como correias transportadoras de longa distância para transporte de minério e escavadeiras elétricas de grande porte com *Cross-pit spreader* para remoção de estéril são opções com potencial não abordadas neste estudo.

Dada a rápida evolução tecnológica, a avaliação contínua de novas tecnologias e abordagens aplicáveis à operação de lavra é essencial. Este estudo fornece uma base sólida para futuras discussões e o desenvolvimento de metodologias inovadoras de lavra, promovendo maior eficiência econômica e operacional na mineração de depósitos tabulares de bauxita na Amazônia.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, G. F. Estudo da produtividade de tratores D11T CD no método de lavra por tiras variando os ângulos do pit em uma mina de bauxita 2017. 52 f. Ouro Preto, MG.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas / Agência Nacional de Mineração ; coordenação técnica de Karina Andrade Medeiros. – Brasília: ANM, 2023. 23 p. ; il. Ano Base 2021.

AMARAL, M. (2008). Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 108p.

CATERPILLAR. Caminhão fora-de-estrada 773G. [s.d.]. Disponível em: https://s7d2.scene7.com/is/image/Caterpillar/CM20190903-51613-62483?wid=1440&hei=579&qlt=75,0&resMode=sharp2. Acesso em: 25 mar. 2023.

CATTERPILLAR, INC. Manual de Produção Caterpillar®. 39a ed., Peorla, EUA, 2009, p. 13- 74

CATERPILLAR. Trator de esteiras D6. [s.d.]. Disponível em: https://s7d2.scene7.com/is/image/Caterpillar/CM20190903-51613-61531?wid=1440&hei=579&qlt=75,0&resMode=sharp2. Acesso em: 25 mar. 2023.

CATERPILLAR. Trator de esteiras D11. [s.d.]. Disponível em: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/dozers/large-dozers/15969853.html. Acesso em: 30 ago. 2023.

CATERPILLAR. Trator de rodas 834K. [s.d.]. Disponível em: https://s7d2.scene7.com/is/image/Caterpillar/CM20190709-43911-96667?wid=1440&hei=579&qlt=75,0&resMode=sharp2. Acesso em: 25 mar. 2023.

CELSO, T. B. Estudo Comparativo entre os Métodos de Decapeamento Tradicional e Wave com auxílio do SOFTWARE DOZSIM®. (Trabalho de conclusão de curso). Universidade do Sul e do Sudeste do Pará. Marabá, 2014.

CLARKE, M.P. DENBY, B. SCHOFIELD, D. Decision making tools for surface mine equipment selection. Mining Science and Technology, n.10. 1990. Pg 323-335.

COSTA, R. R, Projeto de Mineração 1ª edição. Universidade Federal de Ouro Preto, vol. 1 e 2, Ouro Preto, 1979.

COUTINHO, H.L. Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto. 2017. p. 94. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola De Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CURI, Adilson. Lavra de Minas. 3. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.

CURI, A; FILHO, J. D. Mineração a Céu Aberto com uso de Mineradores Contínuos de Superfície. 2015.

DAMASCENO, E. C.; FLORES, J. C. C. A bauxita e a indústria do alumínio. São Paulo: EPUSP, 1998. 26 p.

DÁVALOS, R. VILLARROEL. Uma abordagem do ensino de simulação discreta baseada no uso de recursos computacionais. Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP 2002

DEY, K.; GHOSE, A. K. Review of Cuttability Indices and a New Rockmass Classification Approach for Selection of Surface Miners. April 2011.

DIAS, F. D. Estudo de implantação do minerador de superfície Vermeer TL1255 na Mina de Bauxita de Juruti / PA. 2017. 58 f. Ouro Preto, MG.

GREENWOOD, N. N.; EARNSHAW, A. Chemistry of the elements. 2nd. Ed. Oxford: Butterwoth-Heinemann, 1997. Cap 7, p. 216-267: Aluminium, gallium, lidium and thalium.

GOMES, L. F. A. M., GOMES, C. F. S., ALMEIDA. A. T. de. Tomada de decisão gerencial – Enfoque multicritério. 3ª edição. Editora Atlas. 324p. 2009.

HARTMAN, Howard L. Introductory Mining Engineering. 2nd ed. New York: Wiley, 1992.

HUSTRULID, W. A.; BULLOCK, R. L. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. [s.l.] Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2001.

LAGES, A. R. Estudo preliminar da influência do porte de veículos de carregamento e transporte nos custos operacionais de minas a céu aberto. Monografia de conclusão de curso. Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018. Disponível em http://www.demin.ufmg.br/tcc/00025.pdf. Acesso em: 10 de fev. 2023.

LÉON, F. A. M.;. Evaluacion De La Incertidumbre Geológica Y Operacional Em Planes Mineros De Corto Plazo En Faenas A Cielo Abierto. Universidad De Chile, Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento de Ingeniería De Minas, Santiago de Chile. 2015.

LIEBHERR. Dragline de Mineração HS 8300. 2022. Disponível em: https://www.liebherr.com/shared/media/product/mining-dragline/dragline-de-minera%C3%A7%C3%A3o-hs-8300/dragline-de-minera%C3%A7%C3%A3o-hs-8300/155557/large_image.jpg. Acesso em: 25 mar. 2023.

LIEBHERR. Escavadeira de mineração R9250. [s.d.]. Disponível em: https://www.liebherr.com/content/dam/liebherr/general-images/products/mining-equipment/excavators-mining/R9250%20desktop.jpg. Acesso em: 25 mar. 2023.

MACÊDO, A. J. B.; BAZANTE, A. J.; BONATES, E. J. L. Seleção do método de lavra: arte e ciência. Rem: Revista Escola de Minas, [S.L.], v. 54, n. 3, p. 221-225, jul. 2001. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672001000300010.

NORRENA KP, DEUTSCH CV. Optimal Determination of Dig Limits for Improved Grade Control. Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry: proceedings of the 30th International Symposium. 2002; 1:510-518

NILSSON, D. S. (1982). Open Pit or Underground Mining. Underground Mining Methods Handbook (section 1.5). New York: AIME (pp. 70-87).

OLIVEIRA, M. M. Análise dos indicadores de performance com o custo de minério de ferro em uma mina por meio de regressão múltipla. Universidade Federal Fluminense, Escola De Engenharia, Graduação em Engenharia de Produção. Niterói, RJ, 2016

PIMENTEL, E. N. (2013). Utilização do minerador de superfície (sistema de lavra contínua) na mina de bauxita Paragominas. Universidade Federal do Pará.

RACIA, I. M.. Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 20161.

RICARDO, H. S.; CATALINI, G. Manual Prático de Escavação. 2ª ed. São Paulo: PINI, 1990.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B. Bauxita. In: Rochas & minerais industriais: usos e especificações. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. Parte II. Cap.13. p. 279-304.

SILVA, V. C. Carregamento e transporte de rochas. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2009.

SILVA, Nelson Camurugi Senhorino. METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DE LAVRA INCORPORANDO RISCOS E INCERTEZAS PARA A OBTENÇÃO DE RESULTADOS OPERACIONAIS. 2008. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

SILVA, S. R. C. *et al*. Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico – Área de Proteção Ambiental Sul da região metropolitana de Belo Horizonte. vol. 2. Belo Horizonte, 2005, 185 p.

THE CONSTRUCTION INDEX. Caterpillar 657G at work in France. 2021. Disponível em: https://www.theconstructionindex.co.uk/uploads/news/_800x600_crop_center-center/Cat_657G_2.jpg. Acesso em: 25 abr. 2023.

THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T.. Mine haul road maintenance management systems. Journal Of The Southern African Institute Of Mining And Metallurgy, [s. l], v. 103, p. 303-312, jun. 2003.

U.S. Geological Survey, 2022, Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 202 p., https://doi.org/10.3133/mcs2022.

VELOSO, Norwil. Ascensão e queda das draglines. Revista M&T: Mercado & Tecnologia, São Paulo, v. 210, p. 66-68, maio 2017. Disponível em: https://revistamt.com.br/Arquivos/Edicoes/MT_210.pdf. Acesso em: 04 abr. 2023.

Wikimedia Commons. Cat D11 View 2. 2006. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Cat_D11_View_2.jpg. Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license. Acesso em: 25 mar. 2023.

WIRTGEN GMBH. Cutting, crushing and loading rock in a single operation. Disponível em: < https://www.wirtgen-group.com/en-us/products/wirtgen/technologies/surface-mining/ >. Acesso em: 22 fev. 2023.