



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



SARAH BETTONI GROSSI

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIMENSIONAMENTO DE VEÍCULOS DE
CARREGAMENTO E TRANSPORTE NOS CUSTOS OPERACIONAIS DE UMA
MINA A CÉU ABERTO**

OURO PRETO

2022

SARAH BETTONI GROSSI

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIMENSIONAMENTO DE VEÍCULOS DE
CARREGAMENTO E TRANSPORTE NOS CUSTOS OPERACIONAIS DE UMA
MINA A CÉU ABERTO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto como requisito
parcial para a obtenção do Título de
Engenheira de Minas.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da
Silva

OURO PRETO

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G878a Grossi, Sarah Bettoni.

Análise da influência do dimensionamento de veículos de carregamento e transporte nos custos operacionais de uma mina a céu aberto. [manuscrito] / Sarah Bettoni Grossi. - 2022.

65 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Margarida Silva.

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

1. Mineração a céu aberto. 2. Minas e recursos minerais - Carregamento e transporte. 3. Caminhões. 4. Produtividade. I. Silva, José Margarida. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.68

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



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos onze dias do mês de janeiro de 2022, às 09h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Sarah Bettoni Grossi**, matrícula 15.2.1160, intitulado: “**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIMENSIONAMENTO DE VEÍCULOS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE NOS CUSTOS OPERACIONAIS DE UMA MINA A CÉU ABERTO**”, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. José Margarida da Silva, pelo Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza e o Eng.º de Minas Cassiano Emílio da Silva. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu à discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza, segundo o Eng.º de Minas Cassiano Emílio da Silva e, em último, o Prof. Dr. José Margarida da Silva. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou à discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão da discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que a discente foi aprovada por unanimidade, com a nota 9,0 (nove inteiros). A discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP, no prazo máximo de 15 (quinze) dias, uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão.

Ouro Preto, 11 de janeiro de 2022

José Margarida da Silva
Presidente: Prof. Dr. José Margarida da Silva

Membro: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza

Membro: Eng.º de Minas Cassiano Emílio da Silva

Discente: Sarah Bettoni Grossi

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por sempre guiar meu caminho, me proporcionando muita luz e me dando muita sabedoria durante essa caminhada.

À minha família, principalmente minha mãe, Eliane, por sempre acreditar em mim e me dar todo suporte e amor para que esse sonho fosse possível.

À todos os mestres e funcionários da UFOP por todo apoio e principalmente ao meu orientador José Margarida pela total solicitude e me auxiliar com seus conhecimentos.

À Komatsu, por ter aberto as portas para mim e ter me dado a oportunidade de conhecer o mundo dos equipamentos.

À família que construí em Ouro Preto, República Diferença. Muito obrigada por sempre estarem presentes durante essa jornada, me apoiando, me incentivando e sempre me encorajando a seguir em frente.

E à todas as pessoas que contribuíram na minha jornada para que eu me tornasse Engenheira de Minas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo geral	10
2.2	Objetivos específicos	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1	Etapas de um projeto de mineração	11
3.2	Execução da lavra	12
3.3	Operações unitárias de lavra	12
3.3.1	Escavação e Carregamento	13
3.3.2	Transporte	15
3.3.3	Carregamento e Transporte em Mina a Céu Aberto	20
3.3.4	Tipos de escavadeiras	21
3.3.5	Transporte por caminhões em Minas a Céu Aberto	24
3.4	Estudo de tempos e movimentos	28
3.5	Conceitos para estimativa de produtividade dos equipamentos	28
3.5.1	Volume da caçamba (V_c)	29
3.5.2	Fator de enchimento (<i>fill factor</i>)	29
3.5.3	Empolamento (e)	29
3.5.4	Carga de tombamento (<i>tipping-load</i>)	30
3.5.5	Carga útil (<i>payload</i>)	30
3.5.6	Disponibilidade física (DF)	30
3.5.7	Utilização (U)	31
3.5.8	Tempo de ciclo	31
3.5.9	Eficiência	32
3.5.10	Produtividade de um equipamento	32

4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	Proposições para dimensionamento de frotas.....	33
4.1.1	Dimensionamento de caminhões	37
4.1.2	Dimensionamento de escavadeiras	39
4.2	Proposições para análise econômica.....	43
4.3	Compatibilidade entre equipamentos	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Inputs	46
5.2	Dimensionamento de frotas	53
5.2.1	Dimensionamento da Frota 1.....	53
5.2.2	Dimensionamento da Frota 2.....	53
5.2.3	Dimensionamento da Frota 3.....	54
5.3	Análise econômica.....	55
6	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

RESUMO

Neste estudo, abordam-se os fatores para a realização do dimensionamento de caminhões e escavadeiras, para minas a céu aberto. São apresentados diversos conceitos importantes para o tema e é realizado um estudo de caso para exemplificar como esses são utilizados no dimensionamento. Este trabalho compara a produtividade e custo por tonelada movimentada de três opções de frotas para um projeto de mineração a céu aberto de minério de ferro, de grande porte, e com características semelhantes às de minas do Quadrilátero Ferrífero. Por ser um empreendimento hipotético, várias inferências e projeções foram feitas baseadas em referências bibliográficas e recomendações do fabricante, para se obter um planejamento de custos próximo ao de uma operação real. Dessa forma, tal análise tem como objetivo discutir e comparar a influência do aumento do porte de equipamentos nos custos operacionais de um dimensionamento. Por fim, a aquisição de equipamentos de maior porte nas condições operacionais apresentadas neste trabalho, comprova que o aumento da capacidade dos veículos de carga e transporte se mostra mais vantajosa em relação ao custo-benefício.

Palavras-chave: Dimensionamento de frota, Caminhões, Escavadeiras, Custo por tonelada, Produtividade, Carregamento e Transporte.

ABSTRACT

This study presents the principles for carrying out the dimensioning of trucks and excavators for open pit mines. Several important concepts for the theme are introduced and a case study is carried out to exemplify how these are used in the dimensioning. This work compares the productivity and cost per ton moved of three fleet options for an open-pit iron ore mining project, with characteristics like those of mines in the Cuadrilátero Ferrífero and of large size. As it is a hypothetical enterprise, several inferences and projections were made based on bibliographic references and manufacturer's recommendations, to obtain a cost planning close to that of a real operation. Thus, this analysis aims to discuss and compare the influence of increasing the size of equipment on the operating costs of a dimensioning. Finally, the acquisition of larger equipment under the operating conditions presented in this work, proves that increasing the capacity of cargo and transport vehicles is more advantageous in terms of cost-effectiveness.

Keywords: Fleet sizing, Trucks, Excavators, Cost per ton, Productivity, Loading and Haulage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escavadeira Shovel.....	14
Figura 2 - Escavadeira Backhoe.....	14
Figura 3 - Ciclo de carregamento e transporte.....	18
Figura 4 - Sistema de caminhões autônomos.....	19
Figura 5 - Dozer Komatsu 61EX-23M0.....	21
Figura 6 - Scraper.....	22
Figura 7 - Motoniveladora Komatsu GD535-3.....	22
Figura 8 - Retroescavadeira Komatsu PC 2000-8 e Escavadeira frontal Komatsu 8000-6.....	23
Figura 9 - Carregadeira Komatsu WA800-3.....	24
Figura 10 - Distribuição de custos de lavra convencional por caminhões.....	25
Figura 11 - Caminhão 730-E Komatsu.....	26
Figura 12 - Caminhão 930-E Komatsu.....	26
Figura 13 - Quantidade de escavadeiras e caminhões adquiridos para a frota 1.....	53
Figura 14 - Quantidade de escavadeiras e caminhões adquiridos para a frota 2.....	54
Figura 15 - Quantidade de escavadeiras e caminhões adquiridos para a frota 3.....	54
Figura 16 - Custo de aquisição referente às frotas 1, 2 e 3.....	55
Figura 17 - Custo por hora referentes às frotas 1, 2 e 3.....	56
Figura 18 - Consumo de combustível referentes às frotas 1, 2 e 3.....	56
Figura 19 - Custo de pneus referentes às frotas 1, 2 e 3.....	57
Figura 20 - Custos de manutenção referentes às frotas 1, 2 e 3.....	58
Figura 21 – Custos de operação referentes às frotas 1, 2 e 3.....	58
Figura 22 - Custos por tonelada referentes às frotas 1, 2 e 3.....	59
Figura 23 - Comparativo dos custos totais de cada frota.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados gerais, movimentação de massa, taxa de produção e regime de trabalho.	34
Tabela 2 - DMT de estéril e minério a cada ano de operação.	35
Tabela 3 – Índices de produtividade dos caminhões.	37
Tabela 4 - Índices de produtividade das escavadeiras.	37
Tabela 5 - Tempo, em segundos, de passe das escavadeiras Komatsu em diferentes condições de escavação. Fonte: Komatsu, adaptado.	41
Tabela 6 - Consumo médio de combustível	45
Tabela 7 - Custos Operacionais das Escavadeiras	48
Tabela 8 - Custos operacionais dos caminhões	48
Tabela 9 - Compatibilidade entre equipamentos	48
Tabela 10 - Valores médios de transporte: distância, velocidade e tempo.	49
Tabela 11 - Tempo de ciclo das escavadeiras.	49
Tabela 12 - Produtividade das escavadeiras.	50
Tabela 13 - Produtividade do caminhão 730E.	50
Tabela 14 - Produtividade do caminhão 830E.	51
Tabela 15 - Produtividade do caminhão 930E.	52

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

%	Porcentagem
ρ	Densidade, razão entre massa e volume de uma substância
ANM	Agência Nacional de Mineração
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> , custos de aquisição
DMT	Distância Média de Transporte
GPS	<i>Global Positioning System</i> , sistema de posicionamento global
HH	Horas-Homem
IPCC	<i>In-Pit Crushing and Conveying</i> (Britagem e transporte em cava)
km	Quilômetros
m ³	Metros cúbicos
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> , custos de operação
REM	Relação estéril-minério
ROM	<i>Run of Mine</i> – Movimentação de minério
SEG	Sistema de Excelência em Gestão
t	Toneladas
US\$	Unidade monetária, dólares

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de equipamentos de lavra consiste em um processo de seleção e combinação de veículos de escavação, carga e transporte dentro de uma mina, segundo um estudo previamente realizado, com base na produção visada. Este estágio deve considerar os objetivos de curto, médio e longo prazo, redução de custos e aumento de produtividade, que são muitas vezes afetados por restrições técnicas, operacionais e de segurança (RACIA, 2016). Para a realização de uma análise dos aspectos econômicos, é necessário avaliar os fatores relacionados aos equipamentos, como os custos de aquisição, CAPEX (*Capital Expenditure*), e custos de operação, OPEX (*Operational Expenditure*). Alguns aspectos que influenciam diretamente na produtividade, e conseqüentemente em questões econômicas, devem ser regularmente revisados, como: tempos de ciclo, condições operacionais, consumos de peças e combustível, vida útil dos equipamentos, fatores mecânicos, depreciação, dentre outros. Sendo assim, o dimensionamento de frotas deve ser frequentemente estudado, buscando otimizar a sua produção relacionada à melhor relação custo-benefício. Um bom planejamento operacional, conduz à alocação adequada da frota na operação, potencializando a eficiência da produção (RACIA, 2016). De acordo com Koppe (2007), um superdimensionamento pode levar a um aumento desnecessário de custos, assim como um subdimensionamento pode acarretar uma diminuição de rendimento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Explorar o conjunto de possíveis equipamentos no processo de carregamento e transporte em uma mina a céu aberto, considerando a combinação escavadeira hidráulica e caminhão, de forma a determinar uma frota compatível mais viável economicamente.

2.2 Objetivos específicos

- Revisão bibliográfica das etapas de um projeto de mineração a céu aberto.
- Apresentar os equipamentos mais utilizados em lavra a céu aberto, assim como suas características e especificidades.
- Apresentar os estágios da seleção dos equipamentos.

- Levantar os fatores que influenciam no carregamento e transporte na produção de uma mina.
- Calcular os custos de aquisição e de operação que permitam a escolha a frota mais econômica, segundo as condições do projeto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Etapas de um projeto de mineração

As etapas de um projeto de mineração consistem nas descritas a seguir:

- **Prospecção:** Corresponde à fase de procura de uma jazida e visa à descoberta de ocorrências naturais de substâncias minerais úteis (CURI, 2014). É nesta fase que são feitas as análises geológicas, geofísicas, fotointerpretação de imagens de satélites, entre outros (SOUSA, 2012).
- **Pesquisa mineral:** Tem como fases o delineamento, exploração e avaliação. A fase do delineamento é a principal tarefa executada pelo especialista durante a avaliação geológico-econômica dos depósitos minerais, tornando possível a obtenção de dados para valorização do corpo mineral (CURI, 2014). A exploração ocorre por meio de mapeamento geológico para identificação da ocorrência mineral. A avaliação opera através da quantificação e caracterização mineralógica para resultar na jazida mineral.
- **Lavra:** Consiste em período de projeto e desenvolvimento de planejamento de lavra, e preparação das frentes para a abertura da mina, e da exploração, com a mina já em atividade, para produção de minério. A fase da lavra pode ser em três etapas: planejamento, implantação e produção (CURI, 2014).
- **Descomissionamento ou fechamento de mina:** Fase de desativação da mina. Pode começar a ser realizada em época favorável, após uma determinada área aproximar-se do término de sua vida útil. Visa ao encerramento das atividades minerárias e início da recuperação ambiental da área, com sua projeção para outras finalidades.

De acordo com Pinto (1999), para se estabelecer um projeto de lavra de mina a céu aberto, devem ser considerados alguns aspectos como: métodos de lavra e tratamento de minério a serem utilizados, determinação da sequência e execução da lavra, ritmo de produção e vida útil da mina, e estudo dos diversos custos envolvidos no projeto.

3.2 Execução da lavra

De acordo com William A. Hustrulid e Mark Kuchta (apud Silva, 2016, p.20), seguindo o projeto da mina, é necessário que se projete e construa toda a infraestrutura necessária para dar início às operações, tais como: vias de acesso, alojamentos, refeitórios, rede de energia ou gerador, escritórios, almoxarifado, pilhas de estoque caso seja necessário. A locação dos mesmos deve ser realizada fora dos limites da cava final, para que futuramente não necessitem serem realocados em outro local.

Borges (2013) afirma que após a construção de toda infraestrutura, é necessário que se faça a seleção dos equipamentos a serem utilizados nas atividades, tendo em vista um alto custo de investimento. Nesta parte do processo do projeto é de extrema importância que se tenha bastante atenção na hora da escolha dos equipamentos, pois uma escolha errada pode acarretar aumento dos custos operacionais. Sem uma previsão das variáveis envolvidas e as soluções, todo empreendimento tende a ter maiores dificuldades para se desenvolver, ou está fadado a fracassar na sua implementação.

De acordo com Bozorgebrahimi *et al.* (2003), a primeira e mais importante consideração na seleção de equipamentos é a taxa de produção requerida. Este fator, geralmente, é calculado a partir do estudo das reservas, mercado das *commodities*, estratégia de produção da empresa e do período esperado para o retorno do capital investido (*payback*).

Nos capítulos seguintes, detalham-se os conceitos de eficiência de trabalho, taxa de utilização, e disponibilidade física, que são necessários para os cálculos de produtividade dos equipamentos. Silva (2011) denomina tais parâmetros como fundamentais para a estimativa de produtividade dos equipamentos, que deve ser compatível com a produção requerida.

3.3 Operações unitárias de lavra

As operações unitárias de lavra que são compostas por perfuração, desmonte, carregamento e transporte, são etapas de extrema importância pois, o sucesso do processo de lavra é altamente dependente da eficiência destas operações.

O desenvolvimento da lavra tem início com a preparação da área a ser lavrada, chamada frente de lavra.

Após o decapeamento, que é a remoção da cobertura do minério, o material deve ser desmontado por meio de explosivos ou mecanicamente. Os equipamentos de carga são deslocados até as frentes de lavra para que possam ser carregados e em seguida transportarem os materiais, que pode ser minério ou estéril, carregando-os até um determinado ponto de

descarga o qual pode ser para realizar o beneficiamento ou aterro de estéril, respectivamente (QUEVEDO, 2009).

Curi (2017) lembra que são interrelacionados os sistemas de escavação e manuseio dos materiais, de controle de estabilidade das escavações, de apoio às operações e administrativo.

Neste capítulo, o foco será a descrição das operações unitárias de carregamento e transporte, que são os principais processos de produção na mineração, por estarem diretamente vinculados aos índices de produtividade em cada frente de lavra.

3.3.1 Escavação e Carregamento

As operações de carregamento e escavação são realizadas com o objetivo de retirar e transportar o material desmontado para equipamentos de transporte. Normalmente, isso é feito por unidades escavadeiras ou por unidades carregadeiras.

Segundo Hartman e Mutmanky (2002), escavação implica uma ação de extrair material sólido, enquanto carregamento consiste na elevação de material sem extração do mesmo e posterior descarregamento em algum veículo de transporte. As carregadeiras e escavadeiras se diferenciam, além da condição do material, *in situ* ou afrouxado, principalmente por uma condição de mobilidade, dado que uma carregadeira se desloca com uma velocidade média de até 45 km/h, ao passo que uma escavadeira se desloca com uma velocidade média de 1,5 km/h.

As operações de escavação e carregamento podem ser feitas pelo mesmo equipamento ou por equipamentos distintos (BORGES, 2013). Segundo Pinto e Dutra (2008), os equipamentos mais utilizados para as operações de escavação e carregamento, em conjunto ou não, são escavadeiras a cabo, escavadeiras hidráulicas, retroescavadeiras hidráulicas, escavadeiras *shovel* (ou de caçamba frontal), carregadeiras sobre pneus ou esteira, *motoscrapers*, dragas e monitores hidráulicos. Nas empresas de mineração no Brasil é mais frequente o uso de escavadeiras tipo *shovel* nas operações de escavação direta na frente de lavra, e concomitante carregamento da unidade de transporte, para corpos friáveis, em caminhões ou mesmo correias transportadoras alocadas próximas às frentes de lavra e deslocáveis. Para cada tipo de transporte, deve-se observar a capacidade e como o material deve ser preparado.

As escavadeiras *shovel* (Figura 1) são adequadas para o uso em taludes por terem um elevado alcance máximo para o corte, de acordo com Ricardo & Catalani (2007) apud Borges (2013). Já os equipamentos do tipo *back hoe* (Figura 2), ou retroescavadeiras, operam em cima das bancadas a serem desmontadas, que devem ter boas condições de estabilidade, uma vez que se trata de um equipamento pesado (LAGES, 2018).

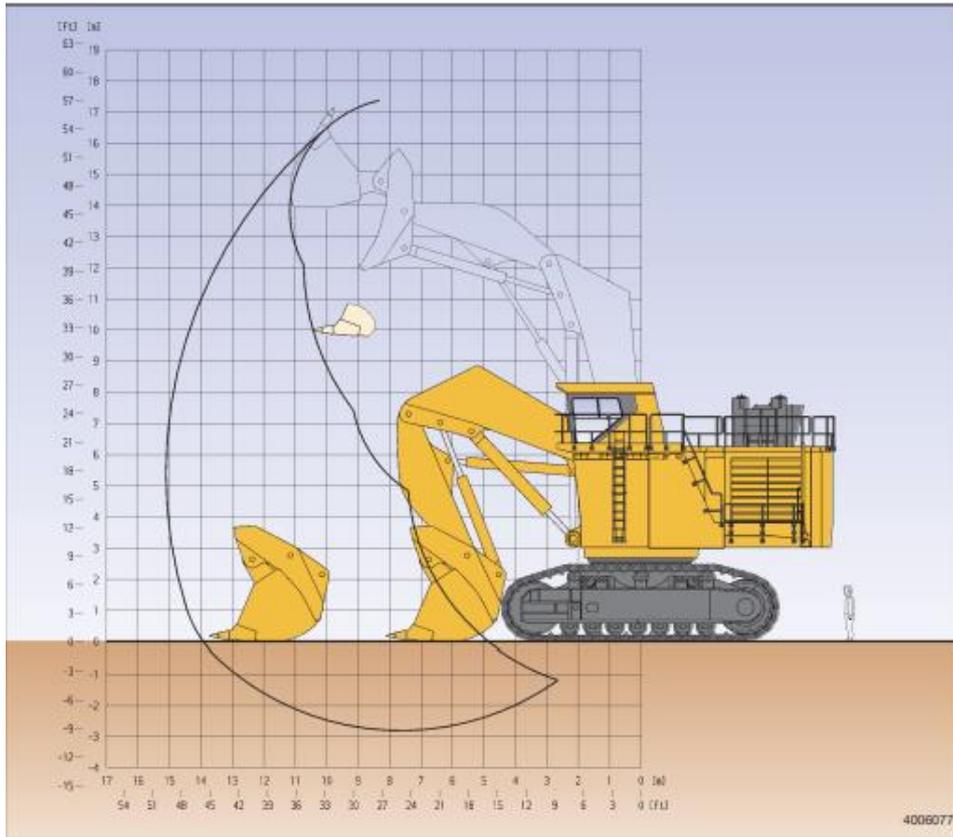


Figura 1 - Escavadeira Shovel.
 Fonte: Komatsu (2021)

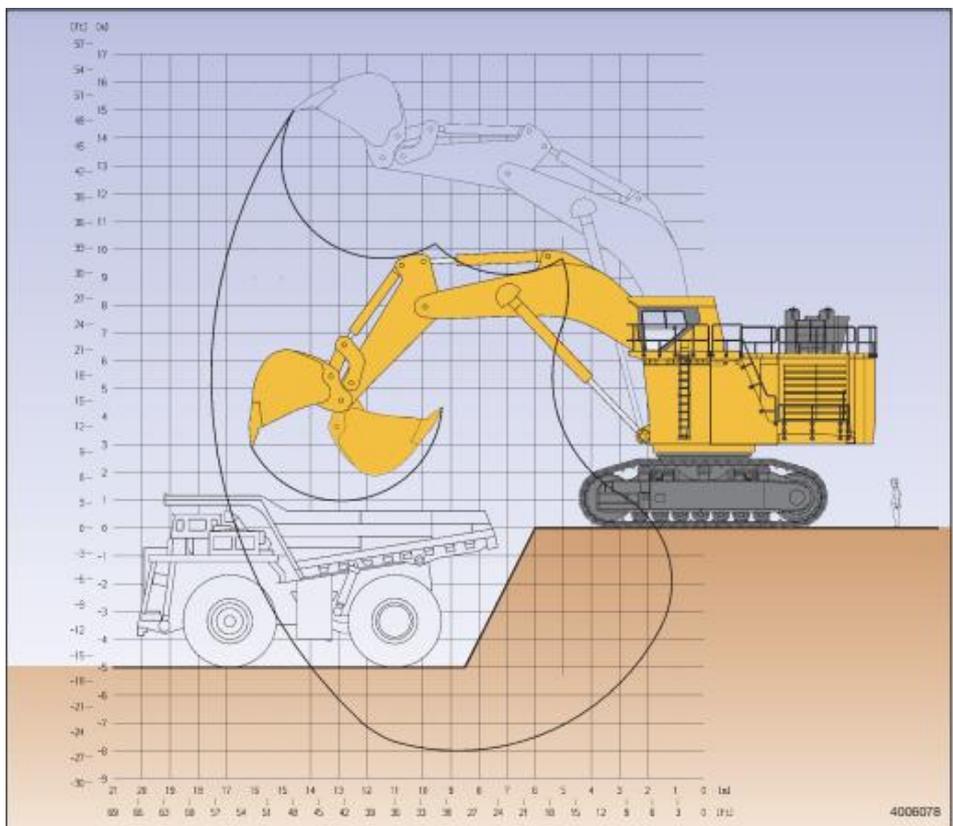


Figura 2 - Escavadeira Backhoe.
 Fonte: Komatsu (2021)

De acordo com Silva (2011), os processos de carregamento e de escavação são constituídos basicamente por quatro movimentos cada um. O fluxo de operação de uma carregadeira, na lavra a céu aberto, é estabelecido por: deslocamento para frente e carregamento da caçamba, deslocamento para trás, deslocamento para frente até o veículo e descarga, e por último o retorno vazio. Enquanto a operação de uma escavadeira se baseia em: enchimento da caçamba, giro carregado, descarga no equipamento de transporte e giro vazio.

Novamente de acordo com Silva (2011), é importante tomar alguns cuidados para otimizar os equipamentos de carregamento como:

- Dimensionamento correto da caçamba.
- Condições das bancadas, incluindo a altura correta para o equipamento de carregamento.
- Boa fragmentação: possibilidade de trabalhar com ciclos e cargas constantes.
- Praça em boas condições de trabalho.

Os equipamentos de carregamento e escavação devem estar adequadamente especificados e dimensionados de acordo com o tipo de material, com a produção desejada e com o tipo de equipamento de transporte.

3.3.2 Transporte

Na mineração existem vários métodos e sistemas de transporte de material. Segundo Borges (2013), os mais comuns são o transporte por caminhões e transporte por correias. Já para Lopes (2010), o método de transporte por caminhões é o mais utilizado em todo o mundo, até uma distância de 4 a 5 km (SOUSA, 2009). São equipamentos que deverão ser utilizados para médios e grandes deslocamentos em virtude das velocidades relativamente elevadas que podem atingir, permitindo obter elevadas capacidades produtivas a baixos custos de operação. Em comparação ao custo de investimento inicial, os caminhões são mais vantajosos do que as correias transportadoras.

A partir da década de 1980, surgiu a opção de utilizar correias mais próximas às frentes de lavra. Na busca por inovação tecnológica, redução de custos e de consumo de combustível fóssil, e da dependência do uso de pneus, a mineração foi conduzida a estudar diferentes modelos de britagem dentro da mina para maximizar suas operações. Conforme Silva e Luz (2012) apud Silva (2020), na busca de alternativas para alcançar tais melhorias, com sistema

mais contínuo possível, a mineração passou a aplicar britagem primária mais próxima à frente de lavra.

De acordo com Santos e Souza (2020), dentre as opções para aumentar a produtividade das operações, a tecnologia de lavra *In-Pit Crushing and Conveying* (Britagem e transporte em cava), chamada de lavra IPCC, tem como principal diferença da lavra convencional realizar o processo inicial de britagem do minério dentro da mina, ou seja, um sistema de britagem móvel, composto por escavadeira, britador e correias interligadas. O objetivo principal do método de lavra IPCC utilizando britador móvel é reduzir os custos operacionais e os impactos ambientais gerados pela exploração mineral. Alcançar essas metas só é possível reduzindo o número de equipamentos de transporte (caminhões) no sistema de produção, visto que estes representam a maior fatia no custo operacional nas minas convencionais, pois tem em seu processo de transporte um elevado consumo de diesel e de pneus, sendo estes considerados os principais responsáveis pela emissão de gases poluentes na atmosfera, pela atividade de mineração.

Sousa (2009) aponta como características do uso de caminhões fora-de-estrada e rodoviários: grande flexibilidade, diluição baixa, boa produtividade, pequenas-médias distâncias, vida útil baixa-média, manutenção elevada, investimento inicial médio-alto. Com o aumento da DMT e os avanços tecnológicos, pode ser mais vantajoso o uso de correias transportadoras nas frentes de lavra. Mas deve-se estudar as condições de cada caso (SILVA, 2020).

O uso de correias transportadoras para locomoção de minério já é uma prática difundida na mineração. Diante do atual cenário mundial, em que a variação do preço das *commodities* é constante, ter uma operação com baixo custo pode significar a manutenção da competitividade da empresa. A aplicação do sistema de correias para realização do transporte pode auxiliar na redução desse custo operacional, que aliado a um eficiente plano de lavra, pode ser contributivo para aumento da lucratividade da mina (RAHMANPOUR & OSANLOO, 2016).

Como vantagens das correias transportadoras, podem ser citadas as seguintes (SOUSA, 2009):

- São excelentes para relevos acentuados e longas distâncias, sem perda de eficiência.
- Alta capacidade (larga escala de transporte).
- Requerem pouca supervisão e média manutenção.
- Baixo custo por tonelada transportada.
- Fácil operação.
- Alta disponibilidade, vida útil superior a 20-25 anos.

- Demanda de energia elétrica relativamente uniforme.
- Instalação envolve fundações leves.
- Menos riscos de acidentes.

Em contrapartida, o sistema de correias possui algumas desvantagens significativas, como:

- Baixa flexibilidade.
- Sistema permanente ou semipermanente.
- Alto custo de implantação, necessidade de que todas as correias interligadas estejam em funcionamento para que ocorra o transporte.
- Granulometria do material limitada a finos ou rocha britada (manuseio de matacões leva a maior desgaste, maior frequência de rasgos).

Diante disto, algumas minerações utilizam o sistema integrado em que são necessários caminhões fora de estrada e correias transportadoras para a realização da lavra e transporte do minério até a próxima etapa do processo. Esse sistema misto, ou seja, transporte por caminhões até um ponto intermediário e depois via correias transportadoras até a pilha pulmão, reduz a distância média a ser percorrida pelo caminhão. A integração dos modais, juntamente com um bom sistema de excelência em gestão (SEG), pode auxiliar a organização para o alcance dos seus objetivos de redução de custo, atendimento aos requisitos de qualidade e aos requisitos ambientais (SALGADO, 2008).

A operação de transporte consiste em transportar o material extraído da mina, que normalmente é executado por meio de perfuração e desmonte por explosivos ou mecanicamente (tratores, escavadeiras ou carregadeiras, dependendo da resistência do material), o qual se direciona até diferentes pontos de descarga, podendo ser:

- Pilhas de estéril (material não aproveitado pelo processo).
- Pilhas de blendagem e/ou homogeneização (para mistura de material).
- Britador (onde o minério é enviado até a usina de beneficiamento).

Em seguida, o caminhão retorna para uma frente de lavra disponível, onde se repetirão as mesmas operações. A fase de transporte inicia quando os caminhões são direcionados até

uma determinada frente de lavra, de forma que, os equipamentos de carga, que estão ali operando, retiram o material e posteriormente carregam os caminhões (QUEVEDO, 2009).

A Figura 3 ilustra o fluxograma de movimentação de caminhões nas operações de carregamento e transporte. O sistema de carregamento e transporte ocorre de forma contínua: assim que o caminhão bascula sua carga, ele segue uma rota para ser carregado novamente.

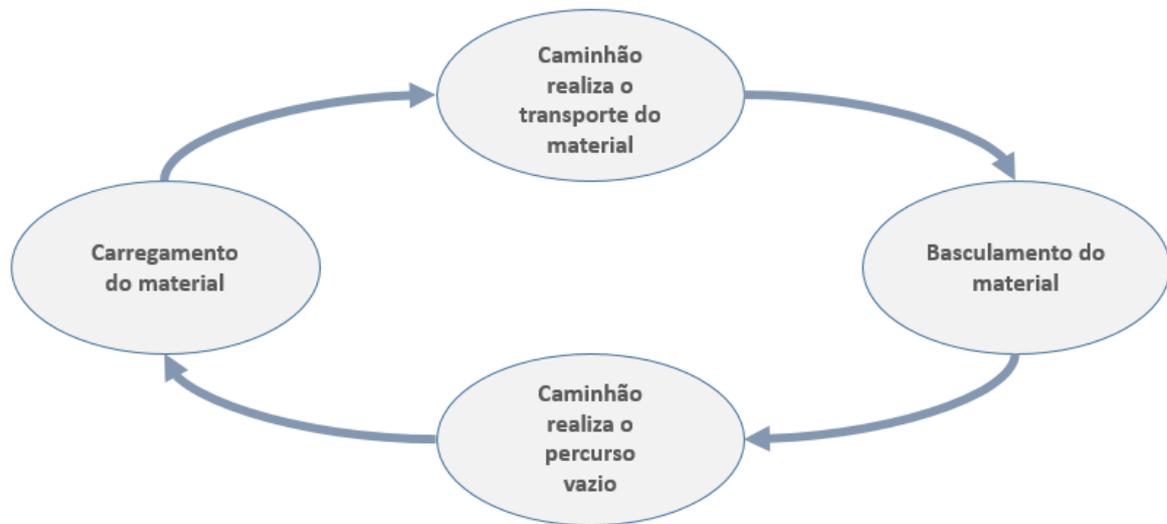


Figura 3 - Ciclo de carregamento e transporte.

Essa operação, principalmente em minas de grande porte, conta com sistemas de despacho e controle à distância, para verificação do desempenho do operador à condição da estrada e velocidade, controle de metas e destinação ao próximo ponto de carregamento. A automação também pode chegar a veículos de transporte autônomos, amostragem ou sensores para verificação do teor contido e informações processadas *on line* para tomadas de decisão.

De acordo com Rivera (2014), os caminhões autônomos são equipados com tecnologias como um sistema de GPS de alta precisão, de modo que se possa tomar conhecimento de sua posição em tempo real e supervisioná-los pela sala de controle. Eles também são providos de sistemas *wireless* de comunicação, que permitem um fluxo contínuo de informações, e contam com sensores de detecção de obstáculos, permitindo detectar a presença de outros equipamentos e pessoas trabalhando ao seu redor e julgar em qual caso deverá reduzir a velocidade ou parar por completo, como apresentado na Figura 4.

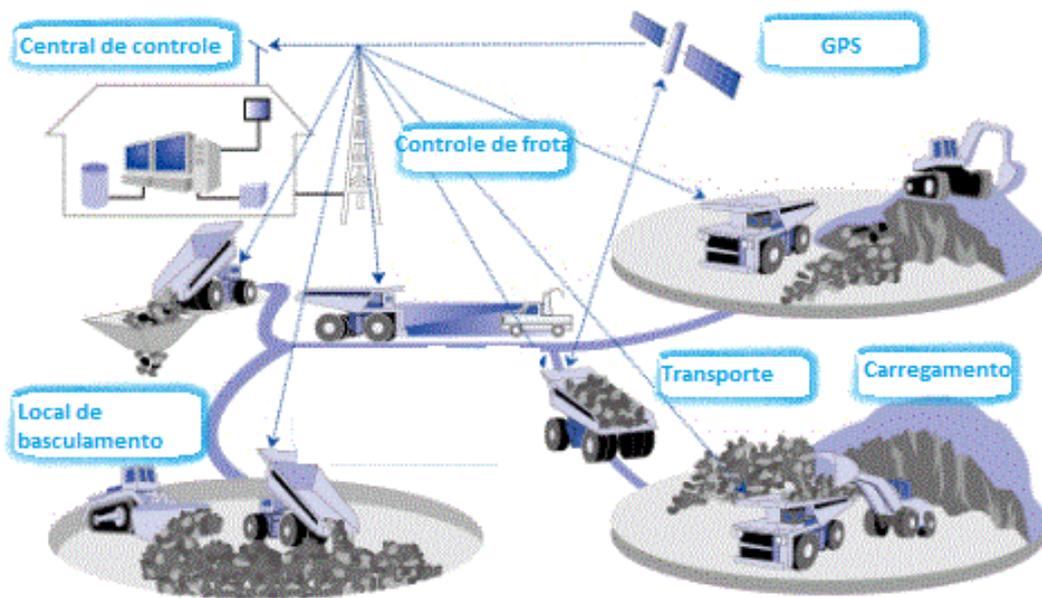


Figura 4 - Sistema de caminhões autônomos.

Fonte: Komatsu, adaptado (2021).

No Brasil, a mineradora Vale recentemente se tornou a pioneira na aplicação de caminhões autônomos para o transporte de minério de ferro. Após seis anos de pesquisa e testes, ela passou a utilizar 7 caminhões autônomos em suas operações na mina de Brucutu situada no estado de Minas Gerais. Atualmente, os caminhões autônomos dividem espaço com outros 6 caminhões operados de maneira convencional. A expectativa da companhia é atingir um aumento da velocidade média dos caminhões. Em termos de porcentagem, se espera um aumento de 15 % na vida útil dos equipamentos com a redução de 10 % nos custos de manutenção e no consumo de combustível (VALE, 2018).

De acordo com Silva (2020), a estocagem de material fragmentado é realizada para assegurar maior capacidade de regularização de fluxo entre duas operações ou para permitir a homogeneização do conjunto de partículas ou fragmentos. Vários métodos e equipamentos são usados na formação de pilhas, em função do cuidado com a operação, da quantidade de material, do local, da facilidade de manutenção, da economia/automação. A prática na indústria mineral é de pilhas alongadas (pilhas elementares, distribuindo-se cada tipo de material ao longo da extensão da pilha).

Engineering and Mining Journal (2015, citada por Silva, 2020) também mostra que scanners a laser podem fazer o monitoramento automático de pátios de estocagem e registrar volumes. Em sistemas, em que se trabalha com volumes de milhares a milhões de toneladas, quando o erro entre a medição física e a contábil não deve ultrapassar 2 % no controle dos ativos

ou em que a diluição pode comprometer os custos e inviabilizar projetos, as tecnologias, sem dúvida, devem ser estudadas, podendo melhorar a confiabilidade de fechamento de estoques.

Para dispor o estéril, a falta de áreas próximas às cavas leva a mineração a procurar novas áreas em lugares mais distantes que o convencional. Esse aumento na distância de transporte acarreta um custo operacional elevado e um consequente aumento no custo de capital por necessitar de uma frota maior de caminhões, que representa o sistema convencional (SILVA, 2020).

Caminhões são utilizados para movimentar tanto minério quanto estéril. A disposição de estéril por caminhões tem sido utilizada ao longo dos anos para formação de pilhas. No entanto, para distâncias maiores do que 5 km, os custos operacionais e o custo de capital ficam altos, o que viabiliza a substituição dos caminhões por correias transportadoras. A mudança na metodologia de disposição de estéril na pilha possibilita a redução no custo operacional, pois o estéril é transportado por correias e disposto por um equipamento formador de pilha (*spreader*). Isto impacta os métodos construtivos, e as vantagens e desvantagens devem ser analisadas para a tomada de decisão de qual método deverá ser usado (SILVA, 2020).

Silva (2020) afirma que estudos geotécnicos são importantes para definir vantagens e desvantagens nos sistemas possíveis. O modo de construção dita como será o avanço da pilha. Apesar de não se ter muitas informações e estudos sobre o método de disposição de estéril por correias, a tecnologia já é aplicada em vários países. O fato do aumento da distância de transporte entre a cava e a pilha de estéril força o surgimento de alternativas operacionais para reduzir os custos, e a utilização de correias transportadoras pode ser uma alternativa viável para isso.

3.3.3 Carregamento e Transporte em Mina a Céu Aberto

De acordo com Lages (2018), as operações de carregamento e transporte consistem em transportar o material extraído da jazida até diferentes pontos de descarga, como pilhas de estéril, pilhas-pulmão e britagem primária. Em minas a céu aberto, têm-se uma maior flexibilidade operacional, sendo assim, equipamentos de grande porte são utilizados com mais frequência, proporcionando uma maior produtividade se comparado às minas subterrâneas. Em geral, o aumento do porte dos equipamentos resulta em menores custos. No entanto, dependendo das condições operacionais que determinada mina pode apresentar, essa premissa não será válida.

Equipamentos maiores são limitados por condições operacionais específicas, como restrições de geometria de cava, alta probabilidade de formação de lama nas frentes de lavra, restrições de largura, dentre outras. Ademais, caso um equipamento de grande porte pare de funcionar, o prejuízo da operação é muito maior. Por isso, é essencial realizar estudos que possam avaliar a quantidade e os tipos de equipamentos para determinada mina (LAGES, 2018).

3.3.4 Tipos de escavadeiras

De acordo com Jaworski (1997), os equipamentos de escavação podem ser subdivididos em cinco grupos, em função do tipo de serviço de escavação a que se destinam:

- **Equipamentos escavadores deslocadores:** São equipamentos que constituem a base fundamental da mecanização na terraplenagem. As máquinas se completam como equipamentos de escavação e transporte, pela colocação do implemento denominado de lâmina. São muito empregados para obras de infraestrutura, como por exemplo, na preparação de acessos, em operações para movimentação de estéril e em pilhas de estoque. Podem também ser utilizados como equipamentos de desmonte e transporte para lavra em tiras. O equipamento mais comum desse grupo é o trator (*dozer*) apresentado na Figura 5, que pode se movimentar sobre rodas ou esteiras. Esse equipamento apresenta boa flexibilidade operacional e opera bem em terrenos acidentados. Dentre as desvantagens, pode-se citar a baixa distância de transporte, baixa velocidade e baixo rendimento operacional.



Figura 5 - Dozer Komatsu 61EX-23M0.
Fonte: Komatsu (2021).

- **Escavadores transportadores:** São equipamentos capazes de executar a escavação do material, recolhê-lo em uma caçamba, efetuar o transporte desse material ao local conveniente e promoverem a sua descarga. Movimentam quantidades menores de material, não sendo aplicados em minas de grande porte. São aplicáveis principalmente em operações de decapagem, construção e manutenção de estradas e eventualmente no transporte de pequenos fragmentos de minério. O equipamento que caracteriza esse grupo é o *scraper* (rastelo) como mostra a Figura 6. Esse veículo apresenta boa flexibilidade, é bastante manobrável, proporciona rápido carregamento, e possui boa velocidade e distância de transporte se comparado ao trator. Todavia, é limitado para carregamento de solo e pequenos fragmentos de rocha.



Figura 6 - Scraper.
Fonte: Catterpillar (2021).

- **Equipamentos niveladores:** São máquinas equipadas com lâmina dotada de uma variada movimentação, pois pode ser levantada ou abaixada, girar em torno de um eixo e ter o movimento de translação provocado pelo deslocamento do seu conjunto. São equipamentos adequados para nivelar terrenos, manutenção de estradas, conformar superfícies e taludes, abrir valetas de pouca profundidade e espalhar materiais sobre superfícies. O equipamento mais conhecido desse grupo é a motoniveladora, exposto na Figura 7.



Figura 7 - Motoniveladora Komatsu GD535-3
Fonte: Komatsu (2021).

- **Equipamentos escavadores elevadores:** São equipamentos que possuem a característica de executar a escavação com a máquina estacionada, isto é, sem se deslocarem na fase do carregamento de sua concha ou caçamba. Escavam em terrenos brandos e em alguns casos duros, descarregam ao lado o material e pode proceder a descarga em unidades de transporte. Os principais equipamentos que caracterizam esse grupo são as escavadeiras, exemplificadas na Figura 8.



Figura 8 - Retroescavadeira Komatsu PC 2000-8 e Escavadeira frontal Komatsu 8000-6.
Fonte: Komatsu (2021)

- **Equipamentos escavadores carregadores:** São equipamentos constituídos pelos tratores de rodas ou esteiras equipados com caçamba frontal, que é acionada através de um sistema de braços articulados. A caçamba permite a elevação do material nela depositado para um posterior despejo em unidades de transporte. Estes equipamentos para efetuarem cada uma das operações de lavra (escavação, carga e transporte), devem se adaptar ao tipo de terrenos em que se operam. Assim, escavar e remover terrenos duros e compactos é muito diferente do que realizar estas operações em terrenos inconsolidados ou brandos, sendo necessariamente diferentes os procedimentos. Ao pretender selecionar os equipamentos para realizar essas operações de arranque, carga e transporte, torna-se necessário conhecer os terrenos a trabalhar. O equipamento mais conhecido deste grupo é a carregadeira, ilustrada na Figura 9.



Figura 9 - Carregadeira Komatsu WA800-3.
Fonte: Komatsu (2021).

Pela necessidade e natureza da grande maioria das operações de lavra a céu aberto, para o processo de escavação, neste trabalho, irá se dar mais ênfase ao quarto grupo de equipamentos, os equipamentos escavadores elevadores. Considerando que, seja em operações onde o desmonte seja mecânico ou com uso de explosivos, essa classe de equipamentos é sem dúvida a mais utilizada em operações de lavra a céu aberto.

3.3.5 Transporte por caminhões em Minas a Céu Aberto

De acordo com Lopes (2010), os caminhões e escavadeiras avançaram em relação ao tamanho de seus portes concomitantemente, mas foram barrados pelas medidas dos pneus, que não acompanharam suas evoluções por falta de tecnologia. Nas últimas décadas, a tecnologia de fabricação de pneus se desenvolveu e os tamanhos dos caminhões e carregadeiras foram ampliados, atingindo as capacidades atuais de produção, o que possibilitou o ajuste do porte das escavadeiras para as novas dimensões dos equipamentos de transporte.

O carregamento e transporte são as atividades mais críticas dentro dos processos de lavra, pois representam cerca de 70 % dos custos operacionais dentre os outros processos do ambiente de mineração. De maneira mais detalhada, Lopes (2010) apud Trueman (2001), pontua que a composição dos custos das operações de lavra (OPEX) se distribui estatisticamente em: 32 % perfuração e desmonte, 16 % carregamento e 52 % transporte por caminhões, conforme ilustrado na Figura 10. A tendência de se utilizar sempre maiores unidades em menor número, permite minimizar estes custos. Essa afirmativa pode ser contestada, quando se analisa a diminuição da capacidade resultante ao se paralisar uma unidade de grande porte, comparada com o efeito causado pela paralisação de uma unidade menor. Silva

(2020) apresenta o caso em mina de xisto, em São Mateus do Sul, no Paraná, em que a baixa utilização do volume da caçamba (pouco mais de 50 %: 68 t em 120 t) levou a se preferir voltar a unidades menores.

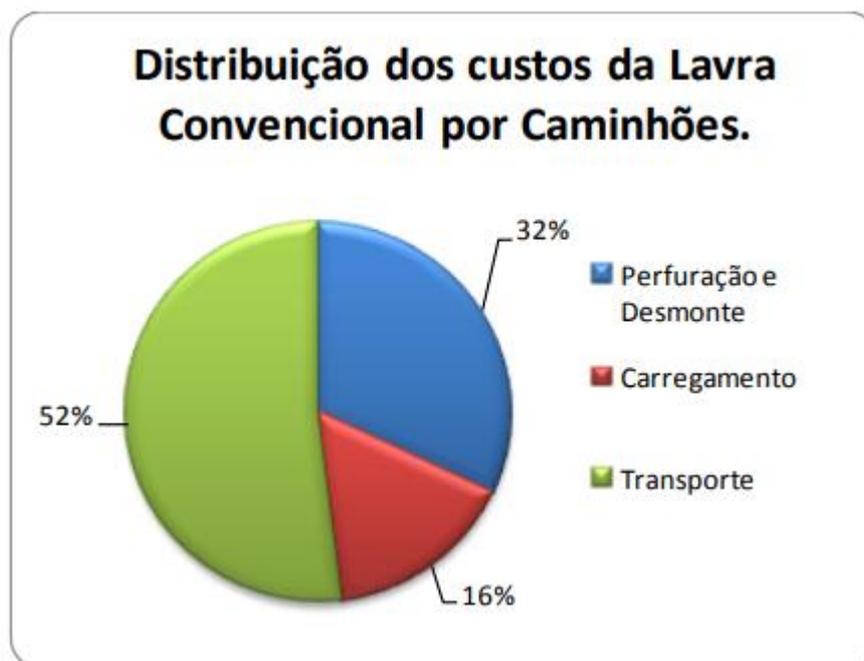


Figura 10 - Distribuição de custos de lavra convencional por caminhões.

Fonte: Lopes (2010) apud Trueman (2001).

A combinação do caminhão com a pá carregadeira ou algum tipo de escavadeira é característica da maior parte das explorações a céu aberto. Segundo Darling (2011), o transporte por caminhões consiste basicamente em desmonte do material “*in situ*”, que normalmente é executado por meio de perfuração e desmonte por explosivo ou mecanicamente (tratores com auxílio de implementos ou, escavadeiras, dependendo da resistência do material). Outra possibilidade, dependendo da geologia do material lavrado é a própria escavadeira ou carregadeira escavar e carregar o equipamento de transporte, no caso, caminhões. O ciclo do método de transporte por caminhões consiste no deslocamento do material até a estação de britagem, descarga no silo e retorno até a frente de lavra.

Atualmente, o mercado apresenta caminhões com capacidades variando de 10 a 400 toneladas, e escavadeiras compatíveis para um carregamento eficiente.

As Figuras 11 e 12 ilustram exemplos de caminhões de grande porte, com diferentes capacidades. O caminhão 730-E da Komatsu, tem capacidade de 177.000 a 186.000 kg, enquanto o modelo 930-E transporta até 291.790 kg.



Figura 11 - Caminhão 730-E Komatsu.
Fonte: Komatsu (2021).



Figura 12 - Caminhão 930-E Komatsu.
Fonte: Komatsu (2021).

As vantagens e desvantagens da operação de transporte com caminhões serão reproduzidas a seguir, de acordo com Souza (2005) apud Abreu (2017).

Vantagens:

- Os equipamentos de transporte podem ser transferidos em pouco tempo para outra frente de lavra, proporcionando flexibilidade operacional.
- Considerando que os teores podem variar de acordo com a profundidade da cava, diferentes bancos podem ser lavrados simultaneamente, garantindo os requisitos relacionados ao teor de alimentação da planta de beneficiamento.
- Durante as paradas da planta de beneficiamento, os equipamentos de transporte podem ser deslocados para frentes de estéril.
- Facilidade de contratação de mão-de-obra.
- A operação não é totalmente comprometida quando é realizada a manutenção de um dos equipamentos de transporte, assim é possível continuar a lavra de forma economicamente viável enquanto uma quantidade mínima de caminhões que estiverem operando.
- A operação de carregamento pode ser feita simultaneamente com pá carregadeira e ou escavadeira, dependendo da compatibilidade dos equipamentos de carregamento e transporte.
- Permite evacuação de pessoas e equipamentos em um curto intervalo de tempo, em caso de situações de risco.

Desvantagens:

- Baixa eficiência energética, sendo que cerca da metade da energia disponível é consumida com o próprio deslocamento do equipamento e a outra metade é utilizada para o transporte da carga.
- Significativo tempo gasto com deslocamento do veículo vazio.
- Usualmente a inclinação utilizada na construção das rampas é de 10%, assim os acessos são extensos e tendem a aumentar à medida que novos bancos são abertos.
- Elevado custo de abertura e manutenção de estradas.
- Em condições climáticas adversas, a operação pode ser limitada a determinados trechos ou até mesmo paralisada.
- São necessários equipamentos auxiliares (caminhões pipa) para realizar a umectação das vias, para a quantidade de poeira nos acessos ser controlada, tornando a operação mais segura e minimizando impactos ambientais.

3.4 Estudo de tempos e movimentos

O estudo de tempos e movimentos é uma técnica poderosa e bastante simples para a otimização de processos. Ela parte da individualização das operações unitárias de um processo produtivo qualquer, acompanhamento das tarefas individuais com o levantamento dos tempos necessários para sua realização e avaliação individual da eficiência e confiabilidade (variabilidade) dessas operações unitárias determinando-se seu tempo médio de execução, tempos de parada, desvio padrão e coeficiente de variação dos tempos registrados. Com esses dados pode-se efetuar a avaliação da eficiência individual de cada operação unitária necessária à produção e trabalhar na sua otimização tendo-se como consequência o aumento global na eficiência do processo produtivo utilizado (SILVA, 2013).

A análise de tempos e movimentos auxilia no trabalho operacional e sistemas administrativos, para que se atinjam os objetivos da organização resultando em aumento de rendimento operacional. O fator tempo é muito importante no estudo do trabalho, uma vez que as modificações ou melhorias dos métodos e processos geralmente têm por objetivo uma melhoria da produtividade.

O dimensionamento dos equipamentos está proporcionalmente atrelado às distâncias percorridas (para os caminhões), tempos de ciclo e taxa de alimentação por frente de operação. A partir da otimização dos tempos de execução de cada operação individual pode-se tornar o sistema global mais eficiente tendo como consequência redução nos tempos de operação que se refletem num menor custo de produção e aumento de produtividade, ambos contribuindo com a melhoria dos processos produtivos e aumento da competitividade das unidades industriais (SILVA, 2013).

3.5 Conceitos para estimativa de produtividade dos equipamentos

De acordo com Bozorgebrahimi et al. (2003), a primeira referência que se deve ter para seleção de equipamentos no dimensionamento é a produção diária requerida. A escala de produção está relacionada à reserva mineral e, conseqüentemente, ao método de lavra adotado, de tal forma que resulte para a mina uma vida útil compatível com o atendimento dos objetivos econômicos de longo prazo (CURI, 2014).

Definida a taxa de produção da mina, é necessário indicar os parâmetros de disponibilidade física, utilização e eficiência de trabalho dos equipamentos. Segundo Komatsu (2013), disponibilidade significa que o equipamento não está em processo de reparo ou reforma. A utilização é um fator de uso da máquina, ou seja, o quanto o equipamento será aplicado em sua operação. E finalmente, o fator de eficiência de trabalho que indica o quanto do tempo do trabalho é produtivo.

As dimensões da máquina e sua respectiva taxa de produção são fatores importantes na seleção dos equipamentos, principalmente porque o aumento do porte não necessariamente resulta em ganho de produtividade (LAGES, 2018). Para a estimativa de produtividade dos equipamentos de carregamento e transporte, são necessários 10 conceitos fundamentais (SILVA, 2011) descritos a seguir.

3.5.1 Volume da caçamba (V_c)

Representa a capacidade operacional dos equipamentos de carregamento e transporte, podendo ser considerada rasa ou coroadada. O volume é uma função da geometria da caçamba, que consiste no espaço vazio contido em seu interior.

$$V_c = \frac{\text{carga máxima admitida na caçamba (t)}}{\text{densidade do material empolado } \left(\frac{t}{m^3}\right)} \quad (1)$$

3.5.2 Fator de enchimento (*fill factor*)

Fator adimensional, aplicável sobre a capacidade operacional que corrige a capacidade da caçamba para o volume real de material que é movimentado. Leva em consideração as características da pilha ou as condições dos desmontes, o ângulo de repouso, a habilidade do operador em encher a caçamba, a altura da bancada e a forma de penetração do equipamento.

3.5.3 Empolamento (e)

É o aumento de volume aparente que a rocha apresenta depois de fragmentada.

$$\lambda = \frac{\lambda c}{\lambda s} \quad (2)$$

Sendo:

λ = fator de empolamento;

λ_c = densidade do material compacto (t/m³);

λ_s = densidade do material solto (t/m³)

$$e = (\lambda - 1) \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

e = empolamento.

3.5.4 Carga de tombamento (*tipping-load*)

É a carga que proporciona o desequilíbrio e conseqüente tombamento do veículo. Mesmo que o equipamento esteja devidamente preparado para escavar, ele pode se encontrar em uma posição de sustentação desfavorável e tombar.

3.5.5 Carga útil (*payload*)

É a capacidade máxima de carga do equipamento. É importante que o material carregado não provoque subcarga nem sobrecarga no equipamento. A sobrecarga pode causar aumento de manutenções, falhas precoces em pneus, aumento do consumo de combustível, entre outros. Já a subcarga reduz a produtividade, o que afeta diretamente os lucros da operação.

3.5.6 Disponibilidade física (DF)

A disponibilidade física é um parâmetro que indica quantas horas disponíveis existem para utilizar o equipamento. Esse fator é calculado em função das horas possíveis para o trabalho (que depende do número de turnos da operação) e da quantidade de horas necessárias para a manutenção, como mostra a equação abaixo:

$$DF = \frac{Hc - (Mp + Mc)}{Hc} \times 100\% \quad (4)$$

Sendo:

H_c = Horas calendário, que são horas disponíveis num determinado período, como por exemplo, um ano;

M_p = Tempo de manutenção preventiva, que corresponde a todo o período de serviços planejados para inspeção e conservação do bom funcionamento do equipamento;

M_c = Tempo de manutenção corretiva, equivalente ao período de serviços executados para corrigir problemas e evitar grandes perdas.

3.5.7 Utilização (U)

O fator de utilização corresponde à parcela das horas disponíveis para o trabalho em que o equipamento se encontra em operação de fato, conforme equação abaixo:

$$U = \frac{H_t}{H_p - H_m} \times 100\% \quad (5)$$

Onde:

H_t = Horas efetivamente trabalhadas;

H_p = Horas planejadas para o trabalho, sendo H_t sempre menor que H_p ;

H_m = Horas destinadas à manutenção, seja preventiva ou corretiva.

A utilização pode ser afetada pela formação de filas, incompatibilidade dos equipamentos da frota, paralisação de outros equipamentos, ausência de operador, condições climáticas desfavoráveis, tipo de desmonte de rocha na mina, entre outros.

3.5.8 Tempo de ciclo

O tempo de ciclo total de uma determinada operação é a soma dos tempos das atividades unitárias. O tempo de ciclo de um equipamento de carga leva em consideração o momento em que o equipamento começa e termina de encher a concha, coloca o material no caminhão e retorna à concha para reiniciar outro ciclo. Já o tempo de ciclo de um caminhão consiste nas

soma dos tempos: manobra, carregamento, ida ao ponto de descarga, manobra para bascular, basculamento, retorno à frente de trabalho e fila.

3.5.9 Eficiência

Eficiência é um indicador que consiste na taxa de produção estimada que seja realmente produzida por um equipamento. Existem fatores de correção devido à própria máquina, destreza do operador, ou as condições do trabalho. É dada pela equação:

$$E = \frac{Tc \text{ min}}{Tc \text{ efetivo}} = \frac{Tc \text{ min}}{Tc \text{ min} + \Sigma tp} \quad (6)$$

Onde:

Tc min: tempo de ciclo mínimo;

Tc efetivo: tempo de ciclo efetivo;

tp: tempo perdido.

3.5.10 Produtividade de um equipamento

A produção, tanto de um equipamento de carga quanto de transporte, é dada pela fórmula:

$$PRODUÇÃO ANUAL = N \times C \times FE \times OC \times HP \times DF \times U \times E \quad (7)$$

Onde:

N = número de ciclos por hora;

C = capacidade da caçamba (t ou m³);

FE = fator de enchimento da caçamba (%);

OC = fator de operação conjugada;

HP = horas programadas por ano;

DF = disponibilidade física do equipamento (%);

U = fator de utilização do equipamento (%);

E = fator de eficiência (%).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho tem por objetivo dimensionar frotas simplificadas de caminhões e escavadeiras hidráulicas de diferentes capacidades para uma mineração a céu aberto. Para isso, foram considerados indicadores de produção para se realizar uma análise econômica, visando levantar custos de aquisição dos equipamentos e importantes custos operacionais, e compará-los entre as frotas dimensionadas. Esse método auxilia o tomador de decisão quanto à combinação mais favorável de uso de escavadeiras e caminhões, ao se comparar faixas de capacidade produtiva e seus respectivos custos, de forma que seja possível analisar e optar pela alternativa com melhor relação custo/produção que minimize os custos totais e específicos.

Após revisão bibliográfica, os dados operacionais de uma mina hipotética, com características baseadas em informações reais de minas do Quadrilátero Ferrífero, foram inseridos em uma planilha eletrônica da plataforma *Microsoft Excel*, assim como características específicas sobre cada equipamento em estudo. Dessa forma, é possível calcular e fornecer ao usuário resultados sobre as capacidades das caçambas das escavadeiras, tempo de ciclo de escavadeiras e caminhões e o número de equipamentos necessários para cada frota considerada.

4.1 Proposições para dimensionamento de frotas

A produção anual de minério de ferro analisada é de 30 milhões de toneladas e a relação estéril minério (REM) é de 0,4. Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019), a classificação quanto ao porte e modalidade de lavra das minerações é baseada na produção mineral bruta (ROM), em que:

- Grande: minas com ROM anual maior que 1.000.000 t.
- Média: minas com ROM anual entre 100.000 t e 1.000.000 t.
- Pequena: minas com ROM anual entre 10.000 t e 100.000 t.
- Micro: minas com ROM anual abaixo de 10.000 t.

Sendo assim, a mina em estudo é classificada como de grande porte, pois sua produção mineral bruta anual é de 18 milhões de toneladas por ano. A mina opera em 3 turnos por dia,

de 8 horas cada, em 7 dias por semana. A Tabela 1 apresenta os dados gerais, informações de movimentação total, de taxa de produção e de regime de trabalho.

Tabela 1 - Dados gerais, movimentação de massa, taxa de produção e regime de trabalho.

Dados Gerais	
ρ material empolado	1,8 t/m ³
REM	0,40
Disponibilidade	
Física	90%
Utilização Física	80%
Eficiência de Trabalho	
	83%
Movimentação de Massa (t)	
Minério (ROM)	18.000.000,00
Estéril	12.000.000,00
Total	30.000.000,00
Taxa de Produção (t)	
Anual	30.000.000,00
Mensal	2.500.000,00
Diária	82.191,78
Horária	3.424,66
Regime de Trabalho	
Turnos	3
Horas por turno	8
Dias na semana	7
Horas por ano	8.760
Horas trabalhadas por ano	5.235

A distância a ser percorrida pelos caminhões é um fator importante para a avaliação dos tempos de transporte, do caminhão carregado e vazio, que somados formam o tempo de ciclo

variável. A distância de transporte está diretamente ligada ao tempo de ciclo por viagem dos caminhões que por consequência reflete a produtividade da frota. No primeiro ano de plano de lavra previsto para a mina em questão, é considerada a distância entre a frente de lavra e o britador primário de 2,5 km, e a distância da frente de lavra à pilha de estéril é de 3,5 km. Neste projeto, será acrescido a cada ano, 200 m nas distâncias médias de transporte de minério e estéril, até o décimo ano de operação, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - DMT de estéril e minério a cada ano de operação.

Ano	DMT - ESTÉRIL (km)	DMT - MINÉRIO (km)
1	3,5	2,5
2	3,7	2,7
3	3,9	2,9
4	4,1	3,1
5	4,3	3,3
6	4,5	3,5
7	4,7	3,7
8	4,9	3,9
9	5,1	4,1
10	5,3	4,3

A movimentação anual de material na mina é obtida pela soma da quantidade total de minério e estéril produzidos, como indicado pela Equação 8.

$$MT = ROM + (ROM \times REM) \quad (8)$$

Em que:

MT = Movimentação anual de material (t);

ROM = Movimentação anual de minério (t);

REM = Relação estéril-minério.

A distância média de transporte global foi determinada pela seguinte Equação 9:

$$DMT = \frac{(DMTm \times Massam) + (DMTe \times Massae)}{MT} \quad (9)$$

Em que:

DMT = Distância média de transporte (km);

DMTm = Distância média de transporte de minério (km);

DMTe = Distância média de transporte de estéril (km);

Massam = Movimentação anual de minério (t);

Massae = Movimentação anual de estéril (t).

As velocidades de tráfego dependem do perfil da mina e se o caminhão está carregado ou vazio. A velocidade média considerada para o caminhão vazio é de 37,7 km/h e para o caminhão carregado é de 26 km/h.

A velocidade média dos caminhões é calculada conforme mostra a Equação 10:

$$Vm = \frac{(DMTm + DMTe) \times 2}{\frac{DMTm}{Vc} + \frac{DMTm}{Vv} + \frac{DMTe}{Vc} + \frac{DMTe}{Vv}} \quad (10)$$

Em que:

Vm: Velocidade média de transporte (km/h);

DMTm: Distância de transporte de minério (km);

DMTe: Distância de transporte de estéril (km);

Vc: Velocidade média do caminhão carregado (km/h);

Vv: Velocidade média do caminhão vazio (km/h).

Com os valores de distância média de transporte global (DMT) e velocidade média de transporte (Vm), pode-se calcular o tempo médio de viagem (Tviagem), como indicado na Equação 11.

$$T_{viagem} = \frac{DMT}{V_m} \times 3600 \times 2 \quad (11)$$

Em que:

T_{viagem} : Média do tempo de viagem do caminhão, carregado e vazio (s);

DMT: Distância média de transporte (km);

V_m : Velocidade média de transporte (km/h).

Os índices de disponibilidade média, utilização física e eficiência para os diferentes caminhões e escavadeiras estão apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 – Índices de produtividade dos caminhões.

Caminhão	Capacidade mássica (t)	Volume da báscula coroada (m³)	Disponibilidade (%)	Utilização (%)	Eficiência (%)
730E	91,00	60,00			
830E	222,00	158,00	90,00	80,00	83,00
930E	292,00	211,00			

Tabela 4 - Índices de produtividade das escavadeiras.

Escavadeira	Fator de enchimento (%)	Capacidade mássica (t)	Volume da camba (m³)	Disponibilidade (%)	Utilização (%)	Eficiência (%)
PC4000	84,00	18,14	12,00			
PC5500	95,00	44,46	26,00	90,00	80,00	83,00
PC8000	81,00	58,38	40,00			

Os fatores de enchimento utilizados para os veículos de carga, foram calculados a partir da planilha eletrônica criada pelo autor. Os cálculos foram realizados de forma a atingir 100% da capacidade de utilização de carga do caminhão da frota correspondente.

4.1.1 Dimensionamento de caminhões

Segundo Komatsu (2013), o tempo de ciclo dos caminhões é composto pelos tempos de: carregamento, viagem carregado, descarga, viagem vazio e de paradas e atrasos. O tempo

de descarga estimado para os caminhões deste estudo é de 35 segundos e o tempo de paradas e atrasos é de 70 segundos, que são considerados aceitáveis para as atividades citadas. A Equação 12 indica o cálculo do tempo de ciclo dos caminhões.

$$TC_{caminhões} = T_{carreg} + T_{viagem} + T_{descarga} + T_{paradas} \quad (12)$$

Em que:

$TC_{caminhões}$: Tempo de ciclo do caminhão (s);

$T_{carregamento}$: Tempo de carregamento total do caminhão (s);

T_{viagem} : Tempo médio de viagem, do caminhão carregado e vazio (s);

$T_{descarga}$: Tempo de descarga (s);

$T_{paradas}$: Tempo de paradas e atrasos (s).

O número de ciclos por hora, é definido através da Equação 13.

$$C_{cam} = \frac{3600}{TC_{caminhões} (s)} \quad (13)$$

Em que:

C_{cam} : Quantidade de ciclos do caminhão, por hora;

$TC_{caminhões}$: Tempo de ciclo do caminhão (s);

A produtividade teórica dos caminhões, é dada pela Equação 14.

$$P_{tcam} = P \times C_{cam} \quad (14)$$

Em que:

P_{tcam} : Produtividade teórica do caminhão (t/h);

P : *Payload* do caminhão (t);

C_{cam} : Quantidade de ciclos do caminhão, por hora.

A produtividade real, é a produtividade teórica ajustada pelos fatores de utilização, disponibilidade e eficiência de trabalho, como mostrado na Equação 15.

$$Prcam = Ptcam \times UF \times DF \times E \quad (15)$$

Em que:

Prcam: Produtividade real do caminhão (t/h);

Ptcam: Produtividade teórica do caminhão (t/h);

UF: Índice de utilização física (adimensional);

DF: Índice de disponibilidade física (adimensional);

E: Índice de eficiência de trabalho (adimensional).

Por fim, a Equação 16 apresenta o cálculo para obtenção do número de caminhões.

$$Ncam = \frac{Ph}{Prcam} \quad (16)$$

Em que:

Ncam: Número de caminhões necessários;

Ph: Produtividade horária da mina (t/h);

Prcam: Produtividade real do caminhão (t/h).

4.1.2 Dimensionamento de escavadeiras

O dimensionamento das escavadeiras é iniciado com o cálculo da massa de material carregado por passe, dado pela Equação 17. Neste estudo, o fator de enchimento das escavadeiras (F), é preenchido até se ajustar a capacidade de utilização de carga do caminhão, que deve ser 100%, como já mencionado no tópico 4.1. É importante que o fator de enchimento da escavadeira seja tal que não leve o caminhão a ser subutilizado nem sobrecarregado, e que o número de passes necessários para o enchimento do caminhão seja entre 3 e 5.

$$Cp = C \times \rho \times F \quad (17)$$

Em que:

Cp: Carregamento por passe (t);

C: Capacidade da caçamba (m³);

ρ: Densidade do material empolado (t/m³);

F: Fator de enchimento (adimensional);

O número de passes para carregar totalmente um caminhão foi obtido através da Equação 18.

$$Np = \frac{Capc}{Cp} \quad (18)$$

Em que:

Np: Número de passes;

Capc: Capacidade do caminhão (t);

Cp: Capacidade por passe da escavadeira (t).

O tempo necessário para carregar totalmente um caminhão, também chamado de tempo de ciclo da escavadeira, é obtido pela Equação 19. De acordo com Komatsu (2013), o tempo de ciclo da escavadeira é a soma do tempo de manobra do caminhão com o tempo do primeiro passe somado aos tempos dos demais passes, como mostrado na equação 19.

$$TCesc = Tm + Tp + T \times (Np - 1) \quad (19)$$

Em que:

TCesc: Tempo de ciclo da escavadeira (s);

Tm: Tempo de manobra do caminhão (s);

Tp: Tempo do primeiro passe (s);

T: Tempo dos demais passes (s);

Np: Número de passes necessários para enchimento do caminhão.

O tempo de manobra para os caminhões em estudo é de 30 segundos e, o tempo do primeiro passe é sempre menor do que os demais, visto que a escavadeira já se encontra com o braço soerguido para realizar a descarga no caminhão quando o caminhão estaciona. Os tempos dos demais passes varia de acordo com o modelo da escavadeira. A Tabela 5 informa as faixas de tempo de passe de escavadeiras hidráulicas em diferentes condições de operação, de acordo com o manual Komatsu (2013). Para este trabalho, considerou-se a condição moderada de escavação.

Tabela 5 - Tempo, em segundos, de passe das escavadeiras Komatsu em diferentes condições de escavação. Fonte: Komatsu, adaptado.

Escavadeira	Fácil	Moderada	Severa
PC4000	24-27	27-29	30-32
PC5500	25-28	28-30	31-33
PC8000	26-29	29-31	32-34

O carregamento de massa por viagem de caminhão é dado pela Equação 20.

$$C_c = N_p \times C_p \quad (20)$$

Em que:

C_c : Carregamento por caminhão (t);

N_p : Número de passes necessários para enchimento do caminhão;

C_p : Capacidade por passe da escavadeira (t).

A utilização da capacidade mássica do caminhão é verificada pela Equação 21.

$$U_c = \frac{C_c}{P} \times 100 \% \quad (21)$$

Em que:

U_c : Fator de utilização da capacidade mássica inserida no caminhão (%);

C_c : Carregamento por caminhão (t);

P: *Payload* do caminhão (t).

Para calcular a quantidade de ciclos da escavadeira que ocorrem em uma hora, utiliza-se a Equação 22.

$$C_{esc} = \frac{3600}{T_{cesc}} \quad (22)$$

Em que:

C_{esc} : Quantidade de ciclos da escavadeira, por hora;

T_{cesc} : Tempo de ciclo da escavadeira (s).

A produtividade teórica das escavadeiras é dada pela Equação 23.

$$P_{tesc} = C_c \times C_{esc} \quad (23)$$

Em que:

P_{tesc} : Produtividade teórica da escavadeira (t/h);

C_c : Carregamento por caminhão (t);

C_{esc} : Quantidade de ciclos da escavadeira, por hora.

Assim como a produtividade real dos caminhões, a produtividade real das escavadeiras é o valor da produtividade teórica ajustada pelos fatores de utilização, disponibilidade e eficiência de trabalho, conforme apresentado na Equação 24.

$$P_{resc} = P_{tesc} \times UF \times DF \times E \quad (24)$$

Em que:

P_{resc} : Produtividade real da escavadeira (t/h);

P_{tesc} : Produtividade teórica da escavadeira (t/h);

UF: Índice de utilização física (adimensional);

DF: Índice de disponibilidade física (adimensional);

E: Índice de eficiência de trabalho (adimensional).

Finalmente, pela Equação 25, pode-se obter a quantidade de escavadeiras necessárias:

$$N_{esc} = \frac{Ph}{Presc} \quad (25)$$

Em que:

Nesc: Número de escavadeiras necessárias;

Ph: Produtividade horária da mina (t/h);

Presc: Produtividade real da escavadeira (t/h).

4.2 Proposições para análise econômica

Para a análise econômica, foram considerados os custos relativos aos equipamentos. As despesas com equipamentos de mineração representam uma grande proporção do custo total de funcionamento de uma mina, logo, a estimativa destes valores é de extrema importância para o estudo final da lucratividade da mina em questão. Existem dois tipos principais de custos relacionados aos equipamentos, que são custos de propriedade e custos de operação.

Os custos de propriedade de um equipamento de mineração referem-se aos custos associados ao longo do ciclo de vida da máquina. Ao tomar uma decisão de compra, o investimento inicial é somente uma parte da equação. Estão incluídos nesses custos: depreciação, juros, impostos e seguros (KOMATSU, 2013).

Em geral, depreciação é um termo de imposto referente ao declínio legalmente permitido em valor a partir do preço original de compra do equipamento e é uma propriedade avaliável, expressa em anos. A depreciação é uma prática comercial para conservar o investimento na forma do equipamento adquirido, ou seja, para fazer os preparativos em uma maneira sistemática para o fundo necessário para substituir o equipamento existente por um novo ou qualquer outro equipamento. O valor de depreciação líquido é o preço de compra original menos o preço de revenda ou o preço de troca, e o período de depreciação varia consideravelmente de acordo com as condições de operação do equipamento (KOMATSU, 2013).

O equipamento adquirido estando ou não em operação, há custo de juros, seguros e taxas. Juros se referem ao juro no investimento, quando o investimento é coberto pelo próprio

fundo do usuário ou ao juro da dívida, quando o investimento é coberto por um débito. Em ambos os casos, os juros terão quantias iguais. Seguros e taxas são cobrados sobre os valores anuais residuais do equipamento que requer conhecimento sobre depreciação como prescrito pela legislação tributária. Juros, seguros e taxas são impostas sobre o valor residual que é a diferença entre o valor de compra e a quantidade depreciada. Os valores investidos nos equipamentos dependem de diversos fatores como: taxa cambial, contratos pré-estabelecidos, quantidade de máquinas compradas, local da mina e do fabricante, entre outros. Para efeitos de segurança de informação, todos os valores financeiros apresentados neste trabalho foram multiplicados por um mesmo fator a fim de se manter a confidencialidade das informações e fazer apenas uma análise comparativa entre as frotas a serem apresentadas.

Os custos de operação de um equipamento de mineração referem-se aos custos da máquina quando ela está em funcionamento. Estão incluídos custos de reparo e manutenção, consumo de combustível, pneus e salários de operadores e mantenedores dos equipamentos. (KOMATSU, 2013).

A manutenção do equipamento é um fator significativo na determinação de sua vida econômica. Se a manutenção for feita de forma adequada, a vida econômica do equipamento será mais extensa, por outro lado, a manutenção inapropriada irá encurtá-la. O custo por hora de cada equipamento agrega todos os componentes do veículo, o tempo de vida útil, o valor de cada peça e a mão de obra referente ao reparo das peças. A partir disso, faz-se o controle de troca, manutenção e reforma dos componentes e estima-se qual seria o custo para manter o equipamento em condições ideais de operação durante toda sua vida útil. Este custo estimado é dividido pelas horas consideradas como vida útil das peças e componentes, e assim obtém-se o custo por hora de cada equipamento. Para este trabalho, foi considerado a vida útil dos caminhões e escavadeiras de 60.000 h, e ambos trabalham 5.245 horas anuais.

Dados mais precisos de despesas com combustível podem ser obtidos por medição direta no campo. Entretanto, é possível antecipar o valor atual ou o consumo aproximado de acordo com as condições atuais de operação sem medir o consumo. O combustível considerado neste estudo é o diesel, com o valor de U \$1,10 por litro. O manual de especificação e aplicação Komatsu (2013), informa o consumo médio de combustível de cada um dos modelos de caminhões e escavadeiras, que pode variar entre baixo, médio e alto, a depender das condições de operação.

Tipos de consumo de combustível das escavadeiras hidráulicas:

- Baixo consumo: Carregamento de materiais de baixa densidade, desnecessária aplicação de grande força para escavação.
- Médio consumo: Carregamento de materiais após detonação ou força moderada para escavação.
- Alto consumo: Escavação direta ou escavação pesada após detonação.

Tipos de consumo de combustível dos caminhões fora de estrada:

- Baixo consumo: Excelentes condições da estrada de transporte; baixo fator de carga; longos períodos de esperas ou atrasos.
- Médio consumo: Boas condições das estradas de transporte; fator de carga moderado; eficiência operacional normal, com ocasionais períodos de esperas ou atrasos.
- Alto consumo: Condições ruins da estrada de transporte; fator de carga acima do recomendado; Alta eficiência de operação, com mínimos atrasos ou esperas.

A Tabela 6 mostra o consumo de combustível por hora trabalhada de escavadeiras hidráulicas e caminhões fora de estrada, ambos em condições de médio consumo.

Tabela 6 - Consumo médio de combustível
Fonte: Komatsu, adaptado (2013).

Consumo de Combustível (l/h)		
Escavadeiras	PC 4000	244,00
	PC 5500	328,00
	PC 8000	552,00
Caminhões	730E	108,25
	830E	140,90
	930E	152,15

Os pneus estão na categoria de itens consumíveis e geralmente têm custos bem significativos. Portanto, é melhor incluir os custos com pneus como item individual nos custos operacionais. Custo horário com pneu é calculado pelo seu preço de venda dividido por sua vida estimada. O custo de pneus é considerado apenas para os caminhões, já que as escavadeiras são movidas por esteiras. Como o desgaste das esteiras varia muito com cada operação, o custo

desse componente não foi considerado. Cada caminhão utiliza 6 pneus, sendo 2 dianteiros e 4 traseiros. Para os caminhões 730E, 830E e 930E foram utilizados os valores de U\$ 24.570,00, U\$ 74.250,00 e U\$ 90.750,00 por pneu, respectivamente. Considerou-se 5.245 horas de vida útil para cada pneu, sendo assim, eles são todos renovados uma vez por ano.

As Tabelas 7 e 8 indicam os custos operacionais utilizados para a análise econômica dos gastos relativos às escavadeiras e aos caminhões.

4.3 Compatibilidade entre equipamentos

A Tabela 9 apresenta, a partir dos dados das capacidades mássicas da caçamba dos caminhões e das escavadeiras em estudo, o número de passes necessários para cada escavadeira encher completamente um caminhão. A compatibilidade entre os equipamentos ocorre se a escavadeira encher o caminhão em 3 a 5 passes, para que não haja a situação de uma grande quantidade de carga sendo depositada rapidamente (menos de 3 passes) ou a perda de produtividade com um elevado tempo de ciclo da escavadeira (mais de 5 passes). Os possíveis *matches* entre os equipamentos apresentados, são destacados na tabela abaixo, e pode-se perceber que as compatibilidades se dão entre: 730E e PC4000, 830E e PC5500, 830E e PC8000 e 930E e PC8000. Todavia, tratando-se de um estudo comparativo entre o aumento dos portes dos veículos e seus custos operacionais e de aquisição, neste trabalho o *match* entre o caminhão 830E e escavadeira PC8000 não é estudado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os dados calculados que serviram de *input* para a realização do trabalho, e os resultados obtidos do estudo de dimensionamento das frotas. São apresentados também os cálculos dos custos operacionais envolvidos em cada cenário analisado, de tal forma que o tomador de decisão possa optar pela conjuntura de melhor custo-benefício.

5.1 Inputs

A Tabela 10 apresenta os valores da distância média de transporte, que varia devido ao acréscimo de 200 m a cada ano entre as distâncias da frente de lavra e do britador, e da frente de lavra e da pilha de estéril. A partir dos valores da distância média de transporte (DMT),

foram obtidos os valores da velocidade média de transporte (V_m), e do tempo médio de viagem (T_{viagem}), que foram usados para os cálculos de tempo de ciclo dos caminhões.

A partir dos dados de tempo de manobra de caminhão, tempo do primeiro passe, tempo dos demais passes, e número de passes necessários para enchimento de um caminhão, foi possível calcular o tempo de ciclo das escavadeiras, como mostrado na Tabela 11. Já na Tabela 12, estão os resultados provenientes da quantidade de ciclos por hora das escavadeiras, capacidade da caçamba, a quantidade de massa de carregamento por caminhão, a produtividade teórica, e a produtividade real, que foi ajustada pelos parâmetros de utilização física, disponibilidade e eficiência.

As Tabelas 13, 14 e 15 referem-se aos resultados da produtividade dos caminhões, 730E, 830E e 930E, respectivamente. Os parâmetros de tempo de ciclo, número de ciclos de caminhões por hora, produtividade teórica e produtividade real, foram calculados com base nas equações 12, 13, 14 e 15, respectivamente, que foram referenciadas no item 4.1.1, no capítulo de Materiais e Métodos.

Tabela 7 - Custos Operacionais das Escavadeiras

Custos operacionais - Escavadeiras					
Escavadeira	Aquisição (U\$)	CPH (U\$/h)	Combustível (U\$/h)	HH – operação (U\$/h)	HH – manutenção (U\$/h)
PC4000	4.207.500,00	147,61	94,38		
PC5500	13.305.600,00	369,53	432,96	18,74	37,49
PC8000	18.480.000,00	535,75	728,64		

Tabela 8 - Custos operacionais dos caminhões

Custos operacionais - Caminhões						
Caminhão	Aquisição (U\$)	CPH (U\$/h)	Combustível (U\$/h)	Pneu (U\$/h)	HH – operação (U\$/h)	HH – manutenção (U\$/h)
730E	2.145.000,00	92,55	89,10	24,75		
830E	5.610.000,00	140,78	184,80	74,25	18,74	37,49
930E	6.930.000,00	160,88	200,64	90,75		

Tabela 9 - Compatibilidade entre equipamentos

Número de passes			
	730E	830E	930E
PC4000	4,73	11,55	15,19
PC5500	2,11	5,16	6,79
PC8000	1,45	3,54	4,66

Tabela 10 - Valores médios de transporte: distância, velocidade e tempo.

Ano	Distância Média de Transporte (km)	Velocidade Média de Transporte (km/h)	Tempo Médio de Viagem (s)
1	2,9	30,78	678,46
2	3,1	30,78	725,25
3	3,3	30,78	772,04
4	3,5	30,78	818,83
5	3,7	30,78	865,62
6	3,9	30,78	912,41
7	4,1	30,78	959,20
8	4,3	30,78	1005,99
9	4,5	30,78	1052,79
10	4,7	30,78	1099,58

Tabela 11 - Tempo de ciclo das escavadeiras.

Escavadeira	Tempo de manobra do caminhão (s)	Tempo do primeiro passe (s)	Tempo dos demais passes (s)	Número de passes	Número de passes arredondado	Tempo de ciclo (s)
PC4000	30,00	5,00	28,00	5,02	5,00	147,00
PC5500	30,00	5,00	29,00	4,99	5,00	151,00
PC8000	30,00	5,00	30,00	5,01	5,00	155,00

Tabela 12 - Produtividade das escavadeiras.

Escavadeira	Ciclos por hora	Capacidade da caçamba da escavadeira (t)	Carregamento por caminhão (t)	Produtividade teórica (t/h)	Produtividade ajustada (t/h)
PC4000	24,49	18,14	90,72	2221,71	1327,70
PC5500	23,84	44,46	222,30	5299,87	3167,20
PC8000	23,23	58,32	291,60	6772,65	4047,33

Tabela 13 - Produtividade do caminhão 730E.

Caminhão 730E								
Ano	Tempo de carregamento (s)	Tempo médio de viagem (s)	Tempo de descarga (s)	Tempo de paradas e atrasos (s)	Tempo de ciclo (s)	Número de caminhões/h	Produtividade teórica (t/h)	Produtividade real (t/h)
1	147,00	678,46	35,00	70,00	930,46	3,87	352,08	210,41
2	147,00	725,25	35,00	70,00	977,25	3,68	335,23	200,33
3	147,00	772,04	35,00	70,00	1024,04	3,52	319,91	191,18
4	147,00	818,83	35,00	70,00	1070,83	3,36	305,93	182,82
5	147,00	865,62	35,00	70,00	1117,62	3,22	293,12	175,17
6	147,00	912,41	35,00	70,00	1164,41	3,09	281,34	168,13
7	147,00	959,20	35,00	70,00	1211,20	2,97	270,47	161,64
8	147,00	1005,99	35,00	70,00	1257,99	2,86	260,41	155,62
9	147,00	1052,79	35,00	70,00	1304,79	2,76	251,08	150,04
10	147,00	1099,58	35,00	70,00	1351,58	2,66	242,38	144,85

Tabela 14 - Produtividade do caminhão 830E.

Caminhão 830E								
Ano	Tempo de carregamento (s)	Tempo médio de viagem (s)	Tempo de descarga (s)	Tempo de paradas e atrasos (s)	Tempo de ciclo (s)	Número de caminhões/h	Produtividade teórica (t/h)	Produtividade real (t/h)
1	151,00	678,46	35,00	70,00	934,46	3,85	855,25	511,10
2	151,00	725,25	35,00	70,00	981,25	3,67	814,47	486,73
3	151,00	772,04	35,00	70,00	1028,04	3,50	777,40	464,57
4	151,00	818,83	35,00	70,00	1074,83	3,35	743,56	444,35
5	151,00	865,62	35,00	70,00	1121,62	3,21	712,54	425,81
6	151,00	912,41	35,00	70,00	1168,41	3,08	684,00	408,76
7	151,00	959,20	35,00	70,00	1215,20	2,96	657,67	393,02
8	151,00	1005,99	35,00	70,00	1261,99	2,85	633,28	378,45
9	151,00	1052,79	35,00	70,00	1308,79	2,75	610,64	364,92
10	151,00	1099,58	35,00	70,00	1355,58	2,66	589,57	352,32

Tabela 15 - Produtividade do caminhão 930E.

Caminhão 930E								
Ano	Tempo de carregamento (s)	Tempo médio de viagem (s)	Tempo de descarga (s)	Tempo de paradas e atrasos (s)	Tempo de ciclo (s)	Número de caminhões/h	Produtividade teórica (t/h)	Produtividade real (t/h)
1	155,00	678,46	35,00	70,00	938,46	3,84	1120,13	669,39
2	155,00	725,25	35,00	70,00	985,25	3,65	1066,94	637,60
3	155,00	772,04	35,00	70,00	1032,04	3,49	1018,56	608,69
4	155,00	818,83	35,00	70,00	1078,83	3,34	974,39	582,29
5	155,00	865,62	35,00	70,00	1125,62	3,20	933,88	558,09
6	155,00	912,41	35,00	70,00	1172,41	3,07	896,61	535,82
7	155,00	959,20	35,00	70,00	1219,20	2,95	862,20	515,25
8	155,00	1005,99	35,00	70,00	1265,99	2,84	830,34	496,21
9	155,00	1052,79	35,00	70,00	1312,79	2,74	800,74	478,52
10	155,00	1099,58	35,00	70,00	1359,58	2,65	773,18	462,05

5.2 Dimensionamento de frotas

Para a realização dos dimensionamentos, o número de caminhões e escavadeiras foi calculado a partir da divisão da produtividade requerida pela mina com a produtividade real de cada equipamento. A quantidade de equipamentos de cada frota foi somada e arredondada para cima.

5.2.1 Dimensionamento da Frota 1

A frota 1 é composta pela combinação da escavadeira modelo PC 4000, com capacidade de caçamba de 12 m³ e um caminhão 730E, que tem capacidade de 91 toneladas. Para atender à movimentação requerida ao longo dos 10 anos de vida útil da mina, é necessária a aquisição de 24 caminhões e 3 escavadeiras, conforme evidenciado na Figura 13.

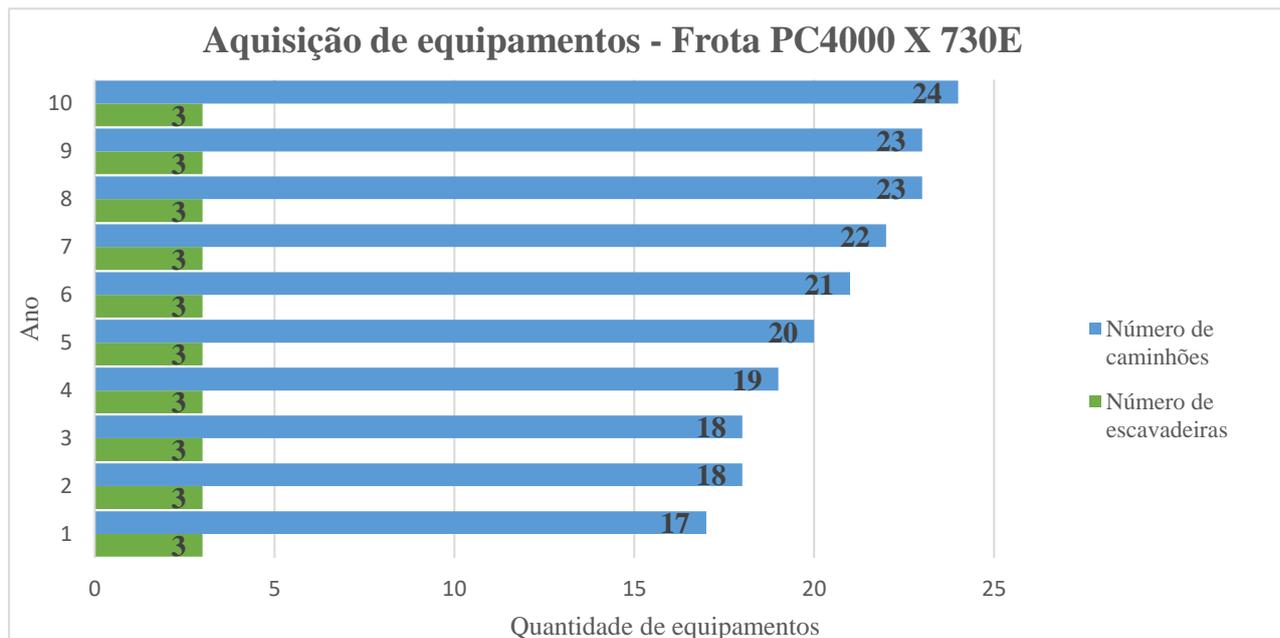


Figura 13 - Quantidade de escavadeiras e caminhões adquiridos para a frota 1.

5.2.2 Dimensionamento da Frota 2

A frota 2 é composta pela combinação da escavadeira modelo PC 5500, com capacidade de caçamba de 26 m³, e um caminhão 830E, que tem capacidade de 222 toneladas. Para atender à movimentação requerida ao longo dos 10 anos de vida útil da mina, é necessária a aquisição de 10 caminhões e 2 escavadeiras, conforme evidenciado na Figura 14.

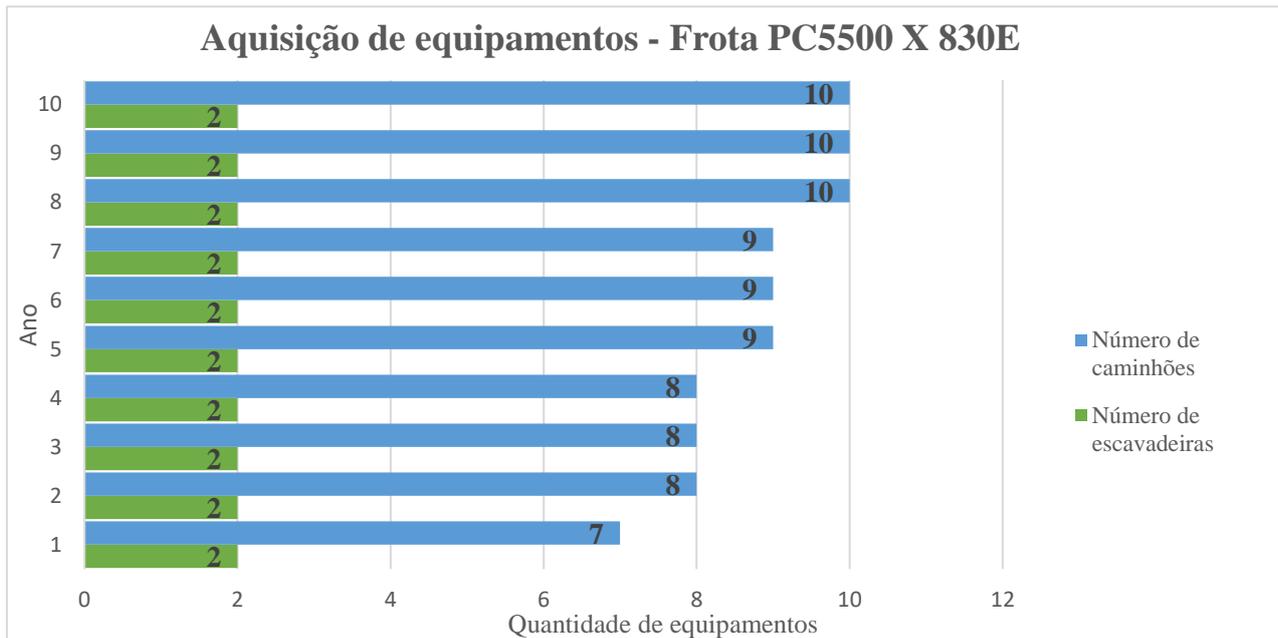


Figura 14 - Quantidade de escavadeiras e caminhões adquiridos para a frota 2.

5.2.3 Dimensionamento da Frota 3

A frota 3 é composta pela combinação da escavadeira modelo PC 8000, com capacidade de caçamba de 40 m³, e um caminhão 930E, que tem capacidade de 292 toneladas. Para atender à movimentação requerida ao longo dos 10 anos de vida útil da mina, é necessária a aquisição de 8 caminhões e 1 escavadeira, conforme evidenciado na Figura 15.

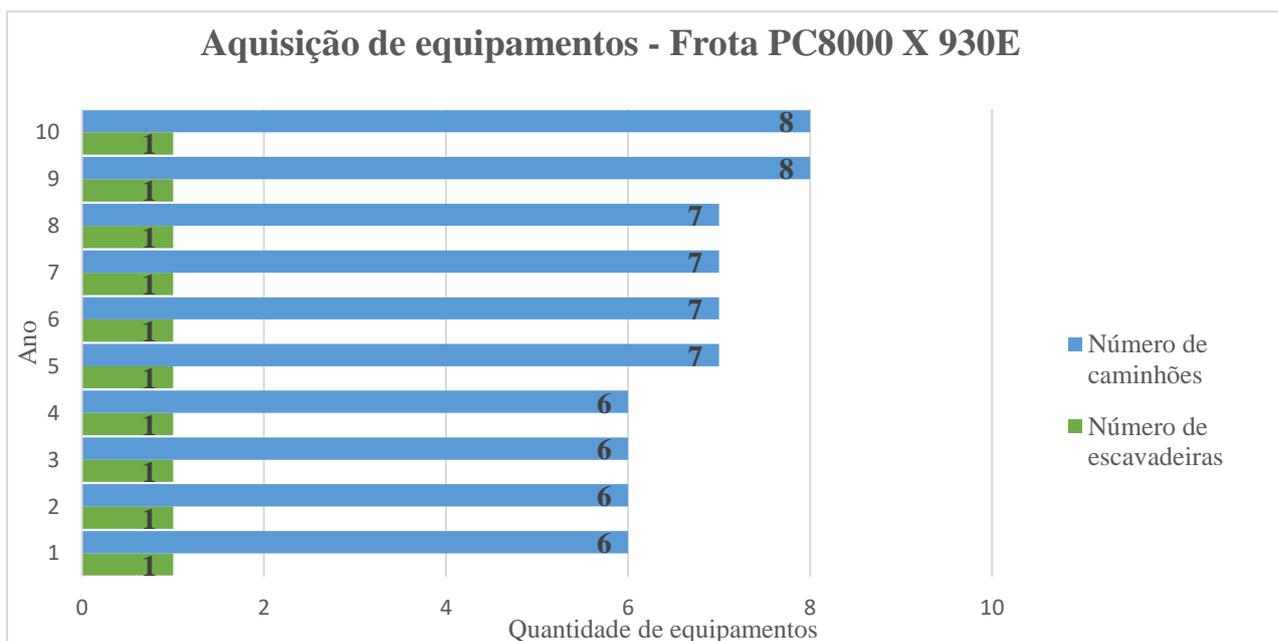


Figura 15 - Quantidade de escavadeiras e caminhões adquiridos para a frota 3.

5.3 Análise econômica

A partir dos cálculos previamente realizados e com as quantidades definidas de equipamentos necessários para atender a demanda de produção da mina em questão, foi possível elaborar uma análise econômica comparativa entre as frotas de diferentes capacidades. Os valores apresentados nesta seção são referentes aos 10 anos de vida útil da mina.

A Figura 16 mostra os custos de aquisição dos equipamentos para as frotas 1, 2 e 3, que são respectivamente, U\$64.102.500,00 U\$82.711.200,00 e U\$73.920.000,00.



Figura 16 - Custo de aquisição referente às frotas 1, 2 e 3.

Em relação ao custo por hora (CPH) dos equipamentos, serão gastos U\$122.508.070,76 para a frota 1, U\$103.543.344,14 para a frota 2, e U\$85.314.14 para a frota 3, como mostrado na Figura 17. Para essa análise, levou-se em conta 5.235 horas trabalhadas ao ano. A maior diferença corresponde ao custo por hora relativa à frota 1 em comparação à frota 3, sendo a frota 1, 30% mais onerosa que a frota número 3.

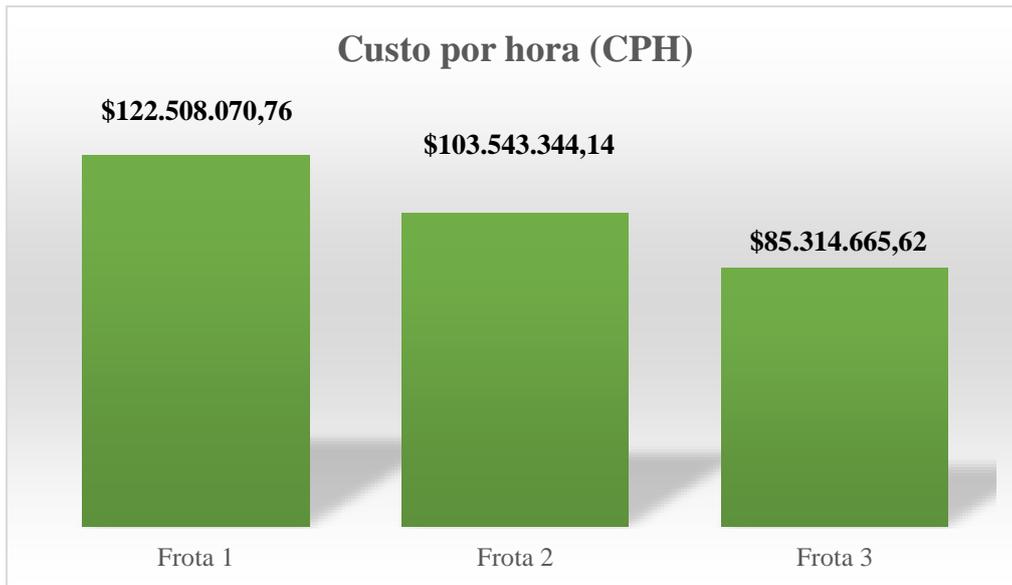


Figura 17 - Custo por hora referentes às frotas 1, 2 e 3.

O custo relativo ao consumo de combustível (Figura 18) foi de U\$169.939.754,03, U\$130.463.977,88 e U\$109.567.628,88 para as frotas 1, 2 e 3, respectivamente. O maior custo de consumo de combustível foi gerado pela frota 1 (PC4000 e 730E), de menor porte. Apesar de ter os equipamentos com especificidades de consumo de combustível menores, o elevado número de equipamentos da frota 1, que foi necessário para atender à produção requerida pela mina, teve como consequência a maior despesa de combustível dentre as outras combinações de frota em estudo. A frota 3, de maior porte (PC8000 e 930E), demonstrou uma compensação em relação ao alto consumo médio de combustível dos seus veículos, com a demanda de menos equipamentos para a operação.



Figura 18 - Consumo de combustível referentes às frotas 1, 2 e 3.

O custo com os pneus dos caminhões foi de U\$26.560.959,48 para a frota 1, U\$34.205.333,18 para a frota 2, e U\$32.305.036,90 para a frota 3. Esse custo foi maior para os caminhões 830E, da frota 2, que se difere em apenas 5% a mais em comparação aos caminhões 930E da frota 3, e cerca de 22% em relação aos caminhões 730E da frota 1, como apresentado na Figura 19.



Figura 19 - Custo de pneus referentes às frotas 1, 2 e 3.

O custo total com a mão de obra de manutenção foi consideravelmente maior por serem considerados mão-de-obra mais especializada. A Hora-Homem de um mantenedor é de U\$37,49/h, enquanto a Hora-Homem dos operadores é de U\$18,74/h.

A mão de obra total de manutenção foi de U\$46.118.777,47 para a frota 1, U\$21.195.999,03 para a frota 2, e U\$15.307.509,56 para a frota 3, como indicado na Figura 20. Já as despesas com mão de obra de operação, apresentadas na Figura 21, foram de U\$23.059.231,68, U\$10.595.172,63 e U\$7.653.702,43 para as frotas 1, 2 e 3, nesta ordem.

A frota 1, por apresentar significativamente um maior número de veículos em operação, apresentou um elevado custo de mão de obra em relação às frotas 2 e 3, de maiores capacidades produtivas. Foi observado um sentido decrescente deste custo em relação ao porte dos equipamentos das frotas.

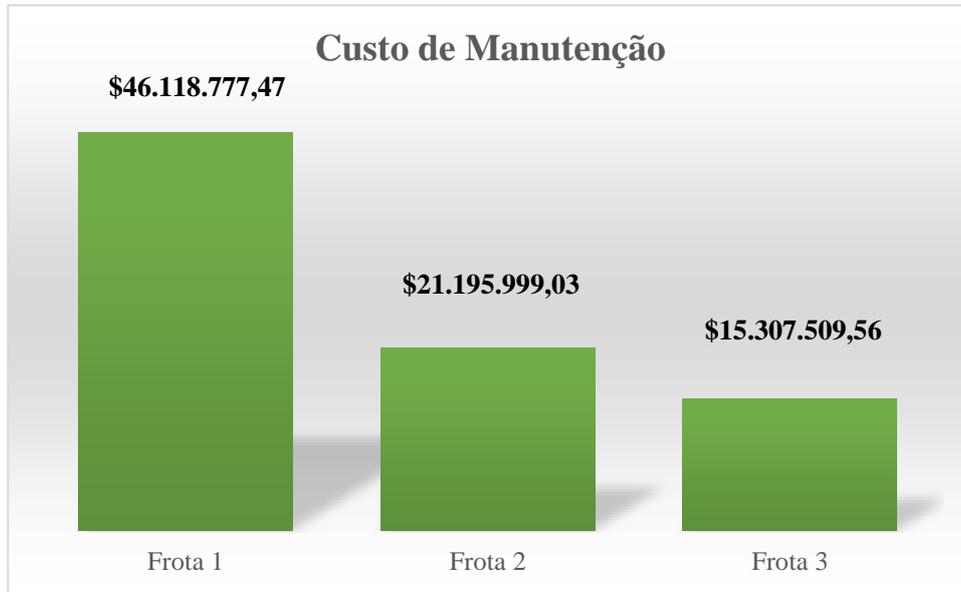


Figura 20 - Custos de manutenção referentes às frotas 1, 2 e 3.



Figura 21 – Custos de operação referentes às frotas 1, 2 e 3.

Em relação aos custos totais, a frota 1 apresentou um custo de U\$452.289.293,41, equivalente a U\$1,51 por tonelada produzida. Já a frota 2, teve um custo total de U\$382.715.026,86, representando um valor de U\$1,28 por tonelada. Finalmente a frota 3, teve um custo total de U\$324.068.543,39, ou U\$1,08 por tonelada. A Figura 22 mostra os comparativos dos custos totais por tonelada produzida das frotas analisadas.



Figura 22 - Custos por tonelada referentes às frotas 1, 2 e 3.

Nota-se que a frota 3 se enquadra no menor custo operacional. Em seguida tem-se a frota 2, e finalmente, a frota 1, que apresenta o custo por tonelada produzida de maior valor.

A Figura 23, mostra as porcentagens de cada tipo de custo em relação à despesa total investida ao longo de 10 anos de operação.

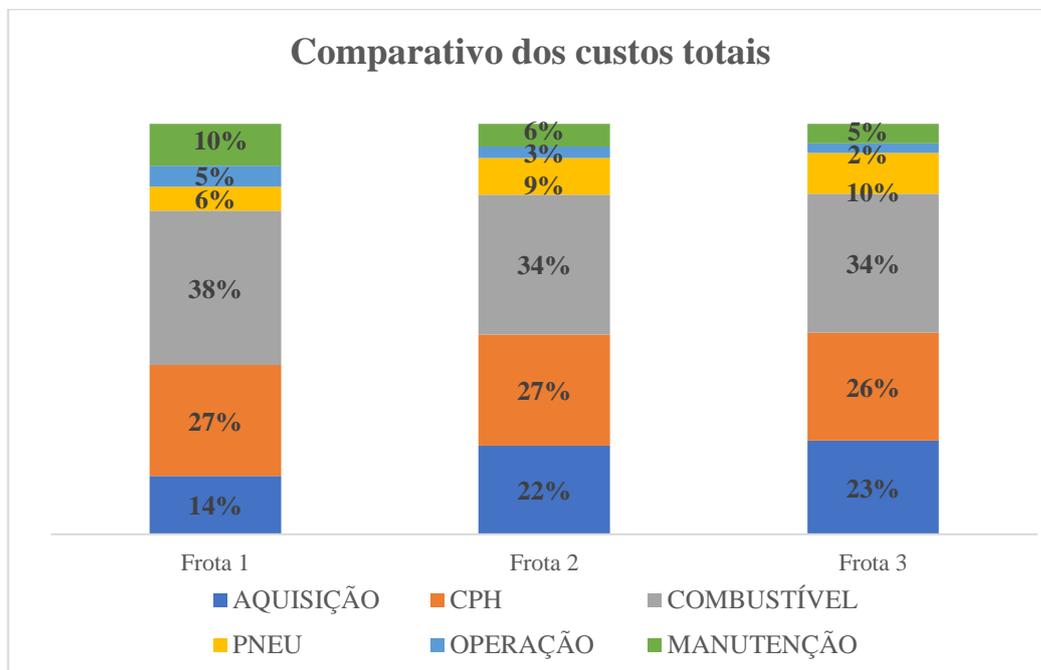


Figura 23 - Comparativo dos custos totais de cada frota.

Os custos de combustível, CPH e aquisição são os mais expressivos para todas as frotas em estudo. O consumo de combustível é responsável por 38% dos custos da frota 1 e 34% das frotas 2

e 3. O Custo por Hora (CPH) determina 27% dos custos das frotas 1 e 2, e 26% dos custos da frota 3. Já as proporções referentes aos custos aquisição das frotas 1, 2 e 3 são de 14, 22 e 23%, respectivamente.

Apesar da frota 3, de maior porte, demandar menos caminhões para sua operação, sua despesa com pneus é responsável por 10 % de seus custos totais, sendo a maior entre todas as frotas dimensionadas. Em comparação aos custos totais, o custo com pneus para a frota 1 representa 6%, e para a frota 2 este valor é de 9%.

Os valores investidos em mão de obra (manutenção e operação) caracterizam 15% dos custos da frota 1, 8% da frota 2 e apenas 7% da frota 3. A frota 1 apresenta uma proporção mais expressiva de custos de mão de obra em relação às demais, pois demanda um maior número de equipamentos para operação.

6 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa estudaram-se três possíveis frotas de equipamentos Komatsu, de carregamento e transporte, compatíveis entre si, com diferentes tempos de ciclo e capacidades produtivas, que devem atender a produção requerida de 30 milhões de toneladas anuais de uma mina a céu aberto. Naturalmente, teve-se como resultado que, quanto menor a capacidade da frota, maior será o número de veículos necessários para a operação. Foram analisados os custos de aquisição e custos operacionais de cada frota, a fim de se realizar uma análise econômica comparativa entre os três possíveis cenários dimensionados e indicar qual apresenta o melhor custo-benefício.

Foi possível observar que o aumento da capacidade de movimentação de material com a utilização de veículos de portes maiores neste estudo, proporcionou uma maior produtividade e redução das despesas de operação, manutenção, combustível e custos por hora dos equipamentos. O custo de diesel é o mais elevado entre todos os gastos operacionais, tendo uma despesa em relação aos custos totais bem semelhantes em cada frota, e gerou um maior impacto na frota de menor porte. Embora os equipamentos de portes superiores consumam uma maior quantidade de litro por hora de diesel, a redução do número de equipamentos em operação atenuou os gastos com combustível.

Concluiu-se que alguns fatores impactaram diretamente na operação como: as distâncias médias de transporte, velocidades permitidas, fatores de utilização, disponibilidade e eficiência, taxa de produção requerida e vida útil da mina. Com estes dados fornecidos pelas condições da mina analisada e as informações de cada equipamento, a frota 3, de maior porte, se mostrou mais vantajosa, em comparação às demais, tanto nos quesitos operacionais quanto econômicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, I. C. **Projeto de melhoria de indicadores de caminhões fora de estrada.** (Monografia em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil, p.7-8, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas** / Coord. Geral Osvaldo Barbosa Ferreira Filho; Equipe Técnica por Marina Dalla Costa et al.; – Brasília: ANM, 2019. 34 p.: il. Disponível em: http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia/mineral/anuariomineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf.

BORGES, Thiago Campos. **Análises dos Custos Operacionais de Produção no Dimensionamento de Frotas de Carregamento e Transporte em Mineração.** 116 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p.43, 2013.

BOZORGEBRAHIMI, E.; HALL, R. A.; BLACKWELL, G. H. "**Sizing equipment for open pit mining – a review of critical parameters**". Institute of Materials, Minerals and Mining in association with Aus IMM. Canada. p. 114-115, 2003.

CURI, A. **Lavra de minas**, Oficina de Textos, São Paulo, 2017.

CURI, A. **Minas a Céu Aberto: planejamento de lavra**, Oficina de Textos, São Paulo, p.17, 2014.

DARLING, P. **SME Mining Engineering Handbook.** 3rd ed., Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, p. 1981, 2011.

HARTMAN, Howard L.; MUTMANSKY, Jan M. **Introductory mining engineering.** John Wiley & Sons, 2002.

JAWORSKI, T. **Manual de Equipamentos para Escavação – Compactação e Transporte**. Revisão e digitalização por Prof. Camilo Borges Neto, Ms.C.Eng. Civil. p. 18-30, 2011.

KOMATSU. **Specifications & application handbook**. Edition 31. Japan, 2013.

KOPPE, J. C. **A lavra e a indústria mineral - estado da arte e tendências tecnológicas**. In: Tendências tecnológicas Brasil 2015; geociências e tecnologia mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

LAGES, A. R. **Estudo preliminar da influência do porte de veículos de carregamento e transporte nos custos operacionais de minas a céu aberto**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p.17-18, 2018.

LOPES, J. R. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com o uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto-propelido**. Ouro Preto: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. p.4-14, 2010.

PINTO, C.; DUTRA, J. G. **INTRODUÇÃO AO PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE LAVRA (A Céu Aberto e Subterrânea)**. Universidade Corporativa Chemtech. Belo Horizonte – MG, 2008.

PINTO, L. R.; SALIBY, E. SIMIN – **Sistema para simulação a eventos discretos utilizando Borland Deplhi**. III Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha, 1999.

QUEVEDO, J. M. G.; DIALLO, M.; LUSTOSA, L. J. **Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2009.

RACIA, I. M. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração**. 2016.

RAHMANPOUR, M.; OSANLOO, M. **Determination of value at risk for long term production planning in open pit mines in the presence of price uncertainty**. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2016.

RIVERA, J. R. M. 2014. **Efectos de la Incorporación de Tecnologías Autônomas em el Diseño y la Planificación Minera**. Faculdade de Ciências Físicas e Matemáticas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade do Chile, Santiago de Chile, 2014.

SALGADO, L. S. **O Sistema de Excelência em Gestão e sua Implantação em uma Empresa de Mineração e Construção**. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia de Produção. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2008.

SANTOS, I. R.; SOUSA, J. C. C. **Aplicação das ferramentas da qualidade para investigação e análise dos desvios nos indicadores chave de desempenho de uma mineradora IPCC brasileira**. Parauapebas, 2020.

SILVA, G. G.; Demuner, P. F.; Pereira, P. E. C.; Araújo, R. P.; Pinto, H. S. D. **Utilização de Ferramentas de Qualidade para Aumento da Vida Útil de Pneus de Caminhões** Fora-de-Estrada. Simpósio de Engenharia de Produção – UFG. Catalão, 2017.

SILVA, J. M.; LUZ, J. A. M. **Britagem em Minas Subterrâneas. In: XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**. Salvador. In: LIMA, L. R.P. A. et al. (ed.). Anais do XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Salvador: EUFBA, 2011. v. 1.

SILVA, J. M. **Tecnologia de Manuseio de Graneis**. Curso DEMIN/UFOP, 2020.

SILVA, J.M.; Luz, J.A.M. **Transporte por correias e britagem em subsolo**. Congresso Brasileiro de Mina. IBRAM. Belo Horizonte, 2012.

SILVA, R.A. **Estudo comparativo de Duas Alternativas de Decapeamento para Lavra de Gipsita na Região do Araripe – PE**. Trabalho realizado no Laboratório de Planejamento de Lavra (LAPLA) do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral – PPGEMinas, UFPE. Recife, 2013.

SILVA, R.C. Aplicação da padronização da carga média de transporte de minério como iniciativa de incremento de produtividade e redução de custos. Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação Lato Sensu da Faculdade de Geologia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – UFPA.p.20, 2016.

SILVA, V. C. Apostila de Carregamento e transporte de rochas. Ouro Preto: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

SOUSA, W. T. Lavra de Mina a Céu Aberto. Academia de Excelência Votorantim. Escola dos Sistemas Minerio-Metalúrgicos, p.29-58. 2009.

SOUSA, W. T. J. Seleção de caminhões rodoviários para mineração utilizando a metodologia de auxílio multicritério à decisão. Estudo de caso: mineração de bauxita. 2012. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil, p.1-3, 2012.

VALE. Vale tera a primeira mina operando somente com caminhões autônomos no Brasil. Disponível em < <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-tera-a-primeira-minaoperando-somente-com-caminhoes-autonomos-no-brasil.aspx> >, 2018.