

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

MONOGRAFIA

**ESTUDO PRELIMINAR DA INFLUÊNCIA DO PORTE DE VEÍCULOS DE
CARREGAMENTO E TRANSPORTE NOS CUSTOS OPERACIONAIS DE
MINAS A CÉU ABERTO**

Aluno: Augusto Ribeiro Lages
Prof^ª. Orientadora: Viviane Borges

Dezembro 2018

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivos	11
1.2. Relevância	12
2. DESENVOLVIMENTO.....	13
2.1. Operações Unitárias de Lavra.....	13
2.1.1 Escavação e Carregamento.....	13
2.1.2 Transporte.....	16
2.2. Carregamento e Transporte em Minas a Céu Aberto.....	17
2.3. A Evolução dos Principais Veículos de Carregamento e Transporte em Minas a Céu Aberto.....	27
2.4. O SUPER PIT	34
3. METODOLOGIA	36
4. RESULTADOS	47
5. CONCLUSÕES	57
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
8. ANEXOS.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Escavadeira Bucket Wheel.....	15
Figura 2: Dragline 8750.....	15
Figura 3: Caminhão fora de estrada passando por baixo de rodovia.....	18
Figura 4: Caminhão fora de estrada com dificuldade de locomoção.....	19
Figura 5: Relação de compatibilidade de caminhões fora de estrada e escavadeiras hidráulicas frontais.....	20
Figura 6: Relação de compatibilidade entre caminhões fora de estrada e retroescavadeiras hidráulicas.....	20
Figura 7: Tratores (Dozers).....	21
Figura 8: Scraper.....	22
Figura 9: Motoniveladora.....	22
Figura 10: Retroescavadeira Hidráulica (esquerda) e Escavadeira Hidráulica Frontal (direita).....	23
Figura 11: Escavadeira Elétrica.....	24
Figura 12: Pá carregadeira.....	24
Figura 13: Custos operacionais de lavra.....	25
Figura 14: Transporte por correias (esquerda) e por caminhão (direita).....	26
Figura 15: Relação entre a escala de produção e distância de transporte de diferentes veículos na mineração a céu aberto.....	27
Figura 16: Escavadeira Marion Model 40, inaugurada em 1908.....	30
Figura 17: Escavadeira Hidráulica Komatsu PC8000.....	31
Figura 18: Caminhão de capacidade de 1.6 toneladas operando em 1916 no estado do Arizona, EUA.....	33
Figura 19: Caminhão Komatsu adaptado para operações autônomas.....	34
Figura 20: Super Pit, Kalgoorlie, Austrália.....	36
Figura 21: Mina de Brucutu, Vale.....	37
Figura 22: Philadelphia shovel construída em 1841 por Willian Otis.....	63
Figura 23: Escavadeira Bucyrus No. 0, produzida em 1888.....	64
Figura 24: Escavadeira hidráulica sob trilhos Kilgore, operando no final da década de 1890.....	64
Figura 25: Escavadeira Marion Modelo 28, produzida em 1911.....	65
Figura 26: Escavadeira Marion 300, produzida em 1915.....	65
Figura 27: Escavadeira Bucyrus 50-B, introduzida em 1922.....	66
Figura 28: Escavadeira Bucyrus 100-B, introduzida em 1926.....	66
Figura 29: Escavadeira hidráulica Marion 5480, introduzida em 1928.....	67
Figura 30: Escavadeira elétrica Bucyrus 1050-B, introduzida em 1941.....	67
Figura 31: Escavadeira Marion 5760, introduzida em 1956.....	68
Figura 32: Escavadeira hidráulica Poclain TY45, produzida em 1960.....	68
Figura 33: Escavadeira elétrica Marion 6360, introduzida em 1965.....	69
Figura 34: Escavadeira hidráulica Liebherr R9800.....	69
Figura 35: Escavadeira a cabo CAT 7495.....	70
Figura 36: Carro sob trilho datado do século XV.....	70
Figura 37: Transporte de minério por trem em 1907. Capacidade de 30 ton por dia.....	71
Figura 38: Transporte de material por mulas em 1907. O transporte era limitado em cerca de 40 km por dia.....	71
Figura 39: Caminhão Moreland sendo carregado na década de 1920.....	72
Figura 40: Caminhão fora de estrada Model 1Z, da Terex criado em 1934.....	72
Figura 41: Caminhão de 37 toneladas sendo carregado em 1937.....	73

Figura 42: Caminhão Dart 75 TA, de 75 toneladas de capacidade, inaugurado em 1951.	73
Figura 43: Caminhão CAT 789, inaugurado em 1986.....	73
Figura 44: Caminhão CAT 797, inaugurado em 1998.....	74
Figura 45: Caminhão Belaz 75710, produzido em 2013 e capacidade de 500 toneladas.	74

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Classificação dos métodos de transporte (Hartman & Mutmansky, 2002)	17
Tabela 2: Capacidade dos caminhões fora de estrada Caterpillar	40
Tabela 3: Capacidade das escavadeiras hidráulicas Caterpillar	40
Tabela 4: Tabela de estimativa de tempo de ciclo de escavadeiras hidráulicas.	42
Tabela 5: Consumo de combustível de escavadeiras hidráulicas.	45
Tabela 6: Consumo de combustível de caminhões fora de estrada.	46
Tabela 7: Tabela de Inputs - Dados gerais, movimentação de mina e velocidades de tráfego de caminhões	47
Tabela 8: Tabela de Input - DMT, taxa de produção e regime de trabalho	48
Tabela 9: Cálculo da quantidade de caminhões fora de estrada Caterpillar	48
Tabela 10: Tempo de ciclo escavadeiras hidráulicas Caterpillar em regime de trabalho moderado.....	49
Tabela 11: Número de passes por caminhão e tempo de carregamento dos conjuntos de caminhões e escavadeiras.....	49
Tabela 12: Número de carregamentos por hora e número de escavadeiras necessárias para cada modelo de caminhão.....	50
Tabela 13: Relação das combinações de caminhões e escavadeiras que trabalham entre 3 e 5 passes.....	50
Tabela 14: Consumo de diesel de caminhões e escavadeiras e número de operadores por turno	51
Tabela 15: Relação dos preços e dos custos de reforma dos pneus para modelos de caminhão Caterpillar em Real	51
Tabela 16: Custos operacionais de cada conjunto de frota de caminhões e escavadeiras em Real.....	52

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1: Custo operacional total por hora trabalhada (R\$/h).....	53
Gráfico 2: Custo operacional total por tonelada movimentada (R\$/t).....	53
Gráfico 3: Influência de cada custo individual no custo operacional total (R\$/h)	53
Gráfico 4: Porcentagem dos custos operacionais nas frotas de caminhões e escavadeiras de pequeno a médio porte.....	54
Gráfico 5: Porcentagem dos custos operacionais nas frotas de caminhões e escavadeiras de grande porte	55

RESUMO

Esse trabalho discorre sobre a evolução recente dos equipamentos de carregamento e transporte (caminhões e escavadeiras) e como essa evolução viabilizou novos empreendimentos mineiros antes considerados inviáveis economicamente, ao possibilitar teores de corte menores para a lavra a partir da introdução de veículos de grande porte. Tal evolução transformou a mineração em uma indústria de maior produtividade, investimento e lucratividade. Nesse estudo, são apresentados os equipamentos mais comuns utilizados nas operações de infraestrutura, carregamento e transporte em minas a céu aberto, um estudo prático de dimensionamento de frotas de caminhões e escavadeiras hidráulicas a nível de FEL 1, e uma análise econômica em que procurou-se estudar a economia de escala. Dessa forma, tal análise visa discutir e comparar a influência do aumento do porte de equipamentos nos custos operacionais de um dimensionamento. Por fim, um exemplo real é apresentado, comprovando que aumento da capacidade dos veículos de carga e transporte na mineração possibilitou o surgimento de novos empreendimentos mineiros em todo o mundo.

Palavras chave: Caminhões, escavadeiras, dimensionamento, carregamento e transporte, custo operacional, economia de escala.

ABSTRACT

This work discusses the recent evolution of loading and transport equipment (trucks and excavators) in mining operations and explains how the evolution of mining vehicles made feasible new mining ventures previously considered economically unviable, as lower cut-off grades were achieved due to the introduction of large vehicles in mining. Such an evolution has turned mining into an industry of higher productivity, investment and profitability. The study presents the most common equipment used in infrastructure, loading and transport operations in open pit mines. A practical study of truck and excavator fleet sizing at FEL1 level and an economic analysis are carried out aiming at discussing the influence of equipment size on the operational costs. Finally, a case study is presented, proving the increase of vehicles' capacity allowed new mining operations to be implemented all around the world.

Keywords: Trucks, excavators, sizing, loading and transport, operational cost, economies of scale.

1. INTRODUÇÃO

A mineração consiste na ação de extrair minérios a partir de depósitos ou massas minerais naturais, com o objetivo de disponibilizar recursos minerais (matéria-prima) para as mais diversas cadeias produtivas da sociedade. Ela é uma das atividades mais importantes e antigas exercidas pelo homem, ocorrendo desde os tempos da pré-história em que era utilizada para a fabricação de utensílios e armas de pedra.

A operação de lavra, um dos assuntos desse trabalho, se baseia em um conjunto de atividades de desmonte, carregamento e transporte. Essas tarefas compõem o que é conhecido por operações unitárias de lavra, constituindo-se a base do ciclo produtivo em uma mineração convencional.

Dentre as operações unitárias de lavra citadas, o carregamento e transporte de material em uma mina, foco principal desse trabalho, é de modo geral a atividade que concentra o maior custo operacional. De acordo com a Caterpillar (A Reference Guide to Mining Machine Applications, 2009), o transporte de minério e de estéril em uma mina pode chegar a representar até 60% do custo operacional total de lavra.

A fim de tornar as operações mais eficientes e atender um mercado cada vez mais dinâmico, a indústria de mineração evoluiu muito ao longo dos anos. Nas últimas décadas, grandes transformações ocorreram no intuito de tornar as operações mais produtivas e com um custo mais baixo. Dentre todas elas, uma das mais notáveis foi o aumento substancial no tamanho e na capacidade dos equipamentos de carregamento e transporte. Acreditando no conceito de economia de escala, “quanto maior, melhor”, as minerações vincularam redução dos custos ao aumento da capacidade dos equipamentos, o que possibilitou o surgimento de empreendimentos em todo o mundo antes considerados inviáveis. Dessa forma, juntamente com a evolução das técnicas de processamento mineral, a evolução dos veículos de carregamento e transporte na mineração permitiu a extração de minérios com um teor de corte mais baixo e com uma produtividade e eficiência maior, na maioria dos casos.

OBJETIVO E RELEVÂNCIA

1.1. Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é mostrar o impacto do aumento de capacidade dos equipamentos de carregamento e transporte na mineração nos principais custos operacionais dessas operações.

Como objetivos específicos pode-se citar:

- Discorrer brevemente sobre as operações unitárias de lavra.
- Descrever a atual conjuntura dos equipamentos de carregamento e transporte, bem como a evolução de seus principais equipamentos na lavra a céu aberto ao longo do tempo.
- Realizar um estudo de dimensionamento de frota de caminhões e escavadeiras hidráulicas com diferentes capacidades e comparar os principais custos operacionais envolvidos.
- Discutir como o aumento da capacidade dos equipamentos de carregamento e transporte foi fundamental para a viabilização de novos empreendimentos em todo o mundo.

1.2. Relevância

O aspecto econômico é a principal relevância desse trabalho. Como já mencionado, a operação de carregamento e transporte é tida como a atividade de maior gasto na lavra, podendo chegar a representar até 60% do custo total da atividade. Dessa forma, entender os princípios básicos e os principais equipamentos que compõem a operação, é fundamental para encontrar possíveis melhorias na atividade e determinar o porte adequado para a mina, que podem resultar em reduções significativas de gastos operacionais.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Operações Unitárias de Lavra

Segundo Hartman e Mutmansky (2002), as operações de lavra são divididas em uma série de atividades que são realizadas através de ciclos, que por sua vez, contemplam diversas ações que visam desmontar e transportar o material lavrado. As operações de lavra mais comuns são: perfuração, desmonte, carregamento e transporte. A sequência de realização dessas operações, objetivando o aproveitamento econômico de uma jazida, é conhecido como ciclo operacional produtivo. Esse ciclo pode sofrer variações dependendo do tipo de equipamento e da tecnologia empregada. Em minas subterrâneas, devido ao confinamento característico e menor grau de liberdade para movimentação de equipamentos e pessoas, o ciclo produtivo pode contemplar atividades que não são necessárias em minas a céu aberto, como por exemplo a instalação de tirantes após o avanço de uma frente de lavra, a operação de ventilação, o preenchimento de galerias após a extração de minério, dentre outros. Em minas a céu aberto que possuem minérios mais friáveis, as operações de perfuração e fragmentação por explosivos podem ser dispensadas. Além disso, com a constante evolução tecnológica e crescimento da automação e mecanização das atividades da mineração, já existem tecnologias que realizam mais de uma operação unitária de uma única só vez, como o caso dos mineradores contínuos, que realizam ao mesmo tempo as atividades de desmonte e carregamento de material.

Neste capítulo, o foco será dado à operação de carregamento e transporte em minerações a céu aberto.

2.1.1 Escavação e Carregamento

A produtividade da mineração sofreu grande transformação ao longo dos anos, impulsionada pelo avanço da tecnologia e, principalmente, da evolução dos equipamentos responsáveis pelas atividades de carregamento e transporte. O aumento de produtividade e eficiência foi alcançado em situações específicas a partir do momento em que se conseguiu aglutinar operações unitárias do ciclo produtivo. No caso de mineradores contínuos, como já citado anteriormente, o equipamento realiza as atividades de fragmentação e manuseio de material, excluindo a necessidade da operação de perfuração

e desmonte por explosivos, que seria executada por outros equipamentos. De forma complementar, o aumento da capacidade dos equipamentos de carregamento e transporte foi essencial para o aumento de produtividade e para a redução de custos em grande parte dos empreendimentos mineiros.

Segundo Hartman e Mutmansky (2002), escavação implica em 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. Na grande maioria dos casos, as operações de carregamento e transporte na mineração consistem de quatro zonas de trabalho que compõem o ciclo de transporte: Carregamento, transporte cheio, descarregamento e transporte vazio. Para tais operações, diversos equipamentos são utilizados, a depender das particularidades, área de aplicação e localização (país) do empreendimento. A classificação desses equipamentos pode ser dividida entre operações a céu aberto ou subterrânea, e entre operações cíclicas ou contínuas.

Em minas a céu aberto, devido à maior flexibilidade da operação, verifica-se uma maior variedade de equipamentos de escavação. Dentre os principais equipamentos que realizam a atividade de escavação de forma cíclica estão: Pá carregadeira, escavadeira hidráulica de carregamento frontal, retroescavadeiras hidráulicas, escavadeira elétrica, dragline, wheel dozer, bulldozer. O maior equipamento de mineração do mundo é a escavadeira Bucket Wheel, equipamento mais conhecido dentre os que realizam a operação de escavação e carregamento de maneira contínua em minas a céu aberto.

Na mineração subterrânea, o equipamento mais comum da operação unitária de carregamento é a LHD, do inglês *Load-Haul-Dump*. Como o próprio nome já diz, esse equipamento realiza as atividades de carregamento, transporte e despejo de material.

A seleção do tipo de equipamento de escavação e carregamento vai depender de uma série de fatores como: produtividade, geometria da mina, aspectos econômicos, tipo de minério, método de lavra, dentre outros.

A figura 1 abaixo mostra a escavadeira Bucket Wheel, considerado o maior equipamento de mineração do mundo, e a figura 2 ilustra uma Dragline da Caterpillar, com capacidade de até 116 metros cúbicos de concha.



Figura 1: Escavadeira Bucket Wheel.

Fonte: Gigantes do mundo (2015)



Figura 2: Dragline 8750.

Fonte: Caterpillar (2018)

2.1.2 Transporte

O transporte de materiais na mineração pode ser realizado verticalmente ou horizontalmente, e apesar de existirem uma variada gama de equipamentos utilizados nessa atividade, os caminhões e as escavadeiras são os equipamentos que mais se destacam por serem os mais utilizados em todo o mundo.

Em minas a céu aberto, os métodos de transporte mais comuns ocorrem por meio de caminhões e correias transportadoras, que realizam a atividade de transporte de maneira cíclica e contínua, respectivamente. Já nas minas subterrâneas, os principais equipamentos desse tipo de operação incluem caminhões de pequeno porte, LHDs, *shuttle cars*, e correias transportadoras. A principal função desses equipamentos é realizar o transporte de material, mas em alguns casos já citados o equipamento é auto carregado, como no caso das LHDs que realizam tanto a operação de carregamento quanto de transporte. Em minas subterrâneas, é bastante comum também o transporte de material por meio de *skips*. Esse equipamento funciona como um elevador realizando o transporte de material por meio de içamento vertical. O transporte através de *skips* nas minas subterrâneas é considerado o de menor custo de transporte, embora o custo de escavação do shaft (escavação onde o *skip* se encontra) consiste no custo de escavação mais caro se comparado a outros métodos de escavação subterrânea, como pistas, ádito, etc.

A tabela 1 apresenta os principais equipamentos de transporte de minério e estéril em minas a céu aberto e subterrânea, e informa a faixa de distância de transporte operada por esses equipamentos.

Operação	Método	Distância de Transporte
Céu Aberto	Trem	Ilimitado
	Caminhão	0,6 – 16 km
	Caminhão articulado	150 - 1500 m
	Pá carregadeira	< 300 m
	Correia Transportadora	0,3 – 16 km
	Mineroduto	Ilimitado
Subterrânea	Trem	Ilimitado
	Caminhão/Shuttle car	150 – 1500 m
	LHD	90 – 600 m
	Skip	< 12 km
	Correia Transportadora	0,3 – 8 km

Tabela 1: Classificação dos métodos de transporte (Hartman & Mutmansky, 2002)

A escolha do tipo de equipamento de transporte não é uma tarefa simples, e assim como a seleção dos equipamentos de carregamento, irá depender de uma série de fatores, como: condições operacionais e climáticas, número de frentes de lavra, requisitos de serviço e manutenção, custos de Capex e Opex, geologia, vida útil do projeto, interferências com o meio ambiente, tecnologia disponível, dentre outros.

2.2. Carregamento e Transporte em Minas a Céu Aberto

A operação de carregamento e transporte consiste basicamente em transportar o material retirado da frente de lavra até pontos de descarga como pilhas de estéril, pilhas-pulmão e britagem primária. Nas minas a céu aberto, a grande flexibilidade operacional permite a utilização de equipamentos com maiores capacidades, proporcionando maior produtividade se comparado as minas subterrâneas. Em geral, o aumento do porte dos equipamentos resulta em menores custos. No entanto, dependendo das restrições

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. Além disso, equipamentos maiores são menos seletivos, e 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, e nem sempre equipamentos maiores serão os mais indicados para todos os tipos de operações.

Para Racia (2016), os equipamentos selecionados para determinada atividade, seja ela de escavação, carregamento ou transporte, devem ser capazes de se adaptar ao tipo de terreno. É fundamental conhecer o local de operação dos equipamentos e todas as condições e restrições operacionais que ali existem. As figuras 3 e 4 exemplificam algumas condições operacionais que limitam o porte dos equipamentos de transporte em minas a céu aberto.



Figura 3: Caminhão fora de estrada passando por baixo de rodovia.

Fonte: Barbosa e Magalhães (2016)



Figura 4: Caminhão fora de estrada com dificuldade de locomoção.

Fonte: Barbosa e Magalhães (2016)

Segundo Lopes e Darling (2010 e 2011, *apud* RACIA, 2016), nas últimas décadas, com o surgimento e modernização da mecanização e significativo avanço tecnológico na fabricação de pneus, o tamanho e a capacidade dos veículos de carregamento e transporte têm sido ampliados. Atualmente, o mercado de mineração conta com uma ampla variedade de modelos de caminhões e escavadeiras com diferentes capacidades e com alta tecnologia empregada. Caminhões rodoviários e fora de estrada de capacidades que variam entre 10 toneladas até 500 toneladas, estão disponíveis no mercado, sendo que para cada modelo de caminhão, um equipamento de carregamento compatível deve existir para completar a operação.

O presente trabalho focará na operação de carregamento e transporte em minas a céu aberto considerando o conjunto escavadeira hidráulica e caminhão. Esse conjunto consiste na relação de equipamentos mais utilizada no mundo para esse tipo de operação, e será alvo de um estudo prático a ser discutido adiante.

As figuras 5 e 6 mostram a relação de compatibilidade entre caminhões fora de estrada e escavadeiras de carregamento frontal e retroescavadeiras da Caterpillar.

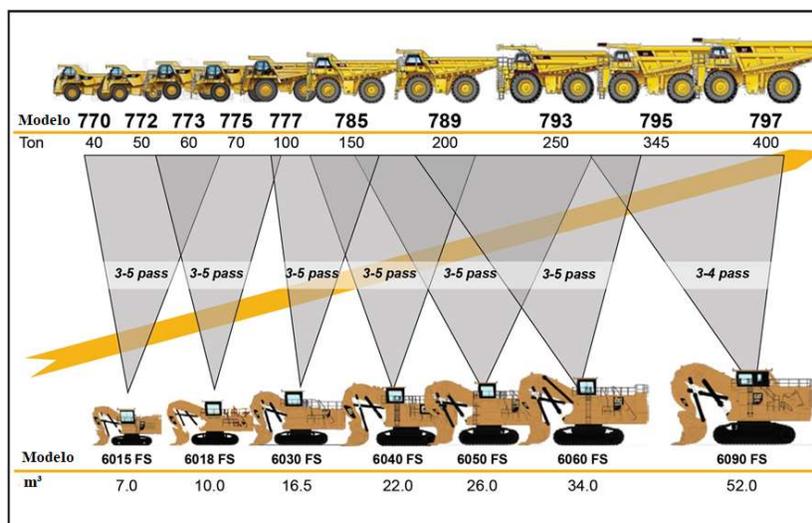


Figura 5: Relação de compatibilidade de caminhões fora de estrada e escavadeiras hidráulicas frontais.

Fonte: CAT Field Guide (2014)

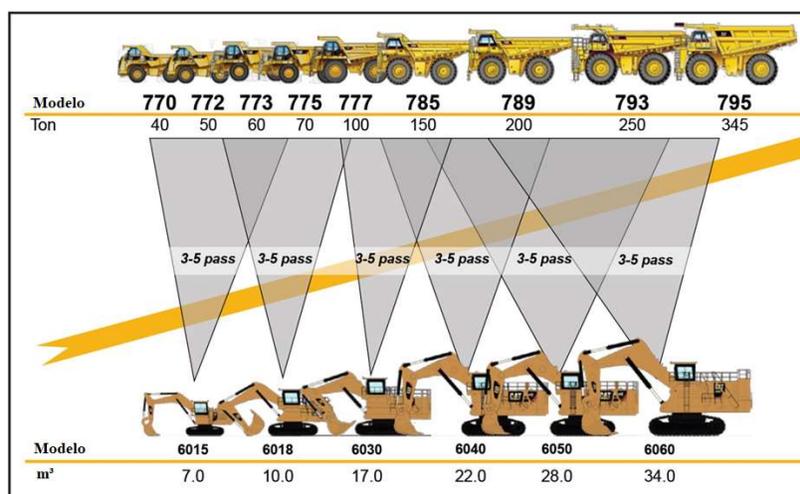


Figura 6: Relação de compatibilidade entre caminhões fora de estrada e retroscavadeiras hidráulicas.

Fonte: CAT Field Guide (2014)

2.2.1. Principais Equipamentos de Escavação em Minas a Céu Aberto.

Segundo Jaworsky (1997, *apud* RACIA, 2016), os equipamentos de escavação podem ser subdivididos em cinco grupos, em função do tipo de serviço de escavação a que se destinam. Esses equipamentos são bastante comuns em empreendimentos mineiros, mas alguns, especificamente, são limitados para obras de infraestrutura, não sendo

empregados no ciclo produtivo de operação de uma mina a céu aberto. Os principais equipamentos de escavação em minas a céu aberto são enumerados a seguir:

1. Equipamentos escavador deslocador: Equipamentos que constituem a base fundamental da mecanização na terraplanagem, sendo bastante 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. Os equipamentos mais comuns desse grupo são os tratores (dozers) apresentados na figura 7, que podem se movimentar sob rodas ou esteiras. Esses equipamentos apresentam boa flexibilidade operacional e operam bem em terrenos acidentados. Dentre as desvantagens, pode-se citar a baixa distância de transporte, baixa velocidade e baixo rendimento operacional.



Figura 7: Tratores (Dozers).

Fonte: Caterpillar (2018)

2. Equipamento escavador transportador: São equipamentos que realizam a escavação do material, recolhem em uma caçamba e transportam ao local de descarga. São considerados equipamentos de infraestrutura já que movimentam quantidades menores de material. 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 como mostra a figura 8. Esse equipamento apresenta boa flexibilidade, é bastante manobrável, proporciona rápido carregamento, e possui boa velocidade e distância de

transporte se comparados aos tratores. Todavia, é limitado para carregamento de solo e pequenos fragmentos de rocha.



Figura 8: Scraper.

Fonte: Caterpillar (2018)

3. Equipamento nivelador: Consiste de máquinas equipadas com lâminas que possuem variada movimentação. São utilizados em operações de infraestrutura para nivelar terrenos, conformar talude, espalhar material, auxiliar na manutenção e construção de acessos, remoção de neve, etc. O equipamento mais conhecido desse grupo é a motoniveladora, ilustrada na figura 9.



Figura 9: Motoniveladora.

Fonte: Caterpillar (2018)

4. Equipamento escavador elevador: São equipamentos que realizam a operação de escavação e carregamento sem se deslocarem. Os principais equipamentos que caracterizam esse grupo são as escavadeiras hidráulicas e escavadeiras elétricas como ilustradas nas imagens 10 e 11.

- As escavadeiras hidráulicas conseguem escavar de maneira seletiva, apresentam bom fator de enchimento, grandes capacidades, escavam terrenos duros ou

friáveis, operam bem em área apertada e são de fácil limpeza e montagem. Por outro lado, necessitam de grande manutenção, possuem vida útil relativamente curta e apresentam custo de capital bastante alto. Essas escavadeiras podem ser do tipo retroescavadeiras ou frontais, dependendo da maneira que a pá ataca a bancada. Normalmente as retroescavadeiras operam em cima de bancadas baixas em condições ideais. Essas bancadas devem ter boas condições de estabilidade e o ângulo de repouso do material não pode ser alto. As escavadeiras frontais operam embaixo da bancada que está escavando e são mais apropriadas para operar em bancadas maiores e na escavação de rochas mais competentes.

- As escavadeiras elétricas apresentam baixo custo operacional e operam bem em rochas mais duras e densas. Dentre as desvantagens desse equipamento é possível citar a baixa mobilidade, o alto custo de capital, são limitados para operações em gradientes baixos e em bancadas largas e com poucas faces, e apresentam baixa capacidade de limpeza.



Figura 10: Retroescavadeira Hidráulica (esquerda) e Escavadeira Hidráulica Frontal (direita).

Fonte: Caterpillar (2018)



Figura 11: Escavadeira Elétrica.

Fonte: Caterpillar (2018)

5. Equipamento escavador carregador: São equipamentos sob rodas ou esteiras que possuem caçamba que realizam o carregamento de material de maneira frontal. A caçamba permite elevação do material através de um sistema de braços articulados e o seu despejo em outras unidades de transporte. Apresentam excelente mobilidade, versatilidade, e baixo custo de capital se comparado a outros equipamentos de escavação. Entretanto, possuem alto custo operacional, vida útil relativamente baixa, e não são aconselháveis para operar em rochas duras e de alta densidade. Em condições ideais, devem operar em solos firmes, secos e em materiais bem fragmentados. O equipamento que caracteriza esse grupo é a pá carregadeira como ilustrado na figura 12 abaixo.



Figura 12: Pá carregadeira.

Fonte: Caterpillar (2018)

2.2.2. Equipamentos de Transporte em Minas a Céu Aberto.

Como já mencionado, existem vários equipamentos que realizam a atividade de transporte de material na lavra a céu aberto. Muitos deles já foram mencionados como equipamentos que também exercem a atividade de carregamento e despejo de material. Entretanto, os métodos de transporte de material mais comuns na lavra a céu aberto são por caminhões e correias transportadoras. Para o presente trabalho, o foco será dado na operação de transporte por meio de caminhões, que é o método de transporte na lavra a céu aberto mais utilizado no mundo (DARLING, 2011, *apud* RACIA, 2016). A figura 13 apresenta as porcentagens dos principais custos operacionais na operação de lavra em minas a céu aberto.



Figura 13: Custos operacionais de lavra.

Fonte: CAT Reference Guide (2009)

O transporte por caminhões consiste basicamente de um ciclo produtivo em que o equipamento viaja carregado e vazio durante a operação de transporte de material da mina.

Dentre as principais vantagens do transporte por caminhões pode-se citar:

- Alta flexibilidade operacional.
- Facilidade de promover a blendagem de diferentes materiais na operação.
- Facilidade de contratação de mão-de-obra.
- Operação não é interrompida quando uma unidade de transporte é paralisada.

- Facilidade de evacuação dos equipamentos nas áreas de risco iminente.
- Boa operação em materiais finos ou grossos.

As desvantagens do transporte por caminhões são:

- Requerem boas condições de estradas e conservação das vias de acesso.
- Em condições climáticas adversas, a operação pode ser prejudicada.
- Alto custo operacional devido ao alto consumo de combustível e pneus, e alta necessidade de manutenção.
- Elevado tempo de deslocamento vazio.
- Aumento da distância de transporte significa incremento do número de caminhões da frota para manutenção da meta de produção.

Com relação ao transporte por correias transportadoras, as principais vantagens são:

- Transporte contínuo, não cíclico.
- Operação em gradientes elevados, ou seja, com alta inclinação.
- Baixo custo operacional.

Dentre as principais desvantagens das correias transportadoras, é possível citar:

- Inflexibilidade operacional.
- Limitado para transportar materiais de granulometria grosseira e angulosos.
- Alto custo de investimento inicial.



Figura 14: Transporte por correias (esquerda) e por caminhão (direita).

Fonte: Vale (2017)

A distância de transporte de uma mineração a céu aberto pode variar bastante dependendo do porte e das condições operacionais da mina. Segundo Racia (2016), a distância de transporte está diretamente relacionada ao tempo de ciclo e à produtividade que determinada frota apresenta. A figura 15 mostra a relação qualitativa entre as capacidades produtivas e as distâncias gerais de transporte dos principais equipamentos de transporte de minas a céu aberto. Percebe-se que o caminhão fora de estrada apresenta a maior capacidade de transporte e consegue percorrer distâncias maiores se comparado aos outros veículos de transporte, perdendo apenas para o caminhão rodoviário nesse quesito.

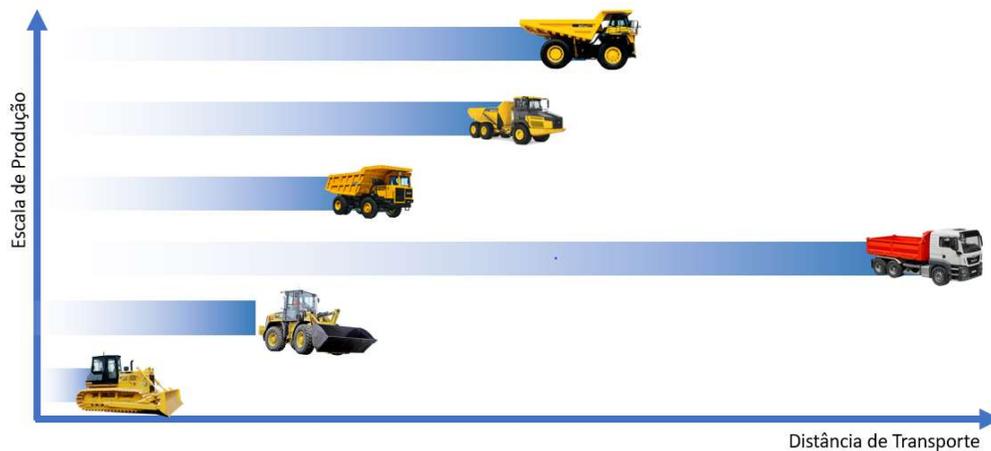


Figura 15: Relação entre a escala de produção e distância de transporte de diferentes veículos na mineração a céu aberto.

2.3. A Evolução dos Principais Veículos de Carregamento e Transporte em Minas a Céu Aberto

Muitas referências na literatura divergem quanto à história dos equipamentos de carregamento e transporte na indústria da mineração. Observa-se que por ser uma das atividades mais antigas exercidas pelo homem, a indústria de mineração passou por grandes transformações tecnológicas ao longo dos anos. Os equipamentos de carregamento e transporte se modernizaram, aumentaram suas capacidades e hoje a mineração é caracterizada por seus equipamentos de grande porte e pela alta tecnologia empregadas em suas atividades, apesar da automação das operações ser um ponto com potencial de se tornar ainda mais presente.

Antes do final do século XIX, carrinhos de mão, picaretas, pequenos veículos puxados sobre trilhos e veículos movidos a animais, eram os principais meios de escavação e movimentação de material nas atividades de mineração. Com a invenção de motores a combustível, houve um acelerado desenvolvimento dos veículos de carga na mineração. As escavadeiras movidas a vapor foram as primeiras grandes máquinas de escavação que surgiram no mundo. A escavadeira foi criada por Willian Otis em 1835 e patenteada quatro anos depois, em 1839. Mas foi a partir da década de 1870 que esses equipamentos ganharam um maior destaque. O período entre 1870 e 1918 é marcado pela ascensão dos Estados Unidos como uma das grandes potências mundiais, época em que houve a reconstrução do país após a Guerra Civil Americana, e a Revolução Industrial estava em pleno andamento, demandando bastante da mineração, da ampliação da malha ferroviária por todo país, e da produção de aço. Nesse momento duas grandes empresas se destacaram por seus equipamentos de escavação, a Marion Steam Shovel Company, fundada em 1884 e a Bucyrus-Erie Shovel Company, que produziu sua primeira escavadeira a vapor anos antes, em 1882. Nessa época, essas escavadeiras já eram responsáveis por construções de estradas e ferrovias, e se destacaram ainda mais por permitirem a construção do grande Canal do Panamá alguns anos depois, em 1908. As escavadeiras a vapor já escavavam carvão desde 1877, e começaram nos Estados Unidos a extrair minério de ferro por volta de 1891 e cobre em 1896. Nessa época, as capacidades das pás variavam de aproximadamente 2 a 6 metros cúbicos. (ASCARZA, Willian, 2015; ORLEMANN, Eric, 2003; ASCARZA, Willian, 2014; WIKIPEDIA, Steam Shovel, 2014).

As escavadeiras a vapor se tornaram populares no mundo todo e se consolidaram na década de 1920, período no qual muitas rodovias e minerações se desenvolveram. Por volta da década de 1930, o desenvolvimento de escavadeiras movidas a diesel e a eletricidade, mais simples e baratas, fizeram com que as pás a vapor entrassem em desuso. Nesse período, já haviam escavadeiras com capacidades de 12 metros cúbicos, e uma década depois, por volta da década de 1940, as escavadeiras a cabo passaram a alcançar capacidades de 25 metros cúbicos. Após a Segunda Guerra Mundial, a demanda por carvão e outros minerais cresceu e novos equipamentos de escavação foram surgindo e se modernizando. Por volta das décadas de 1950 e 1960, com o advento de mangueiras hidráulicas robustas, escavadeiras hidráulicas mais versáteis se tornaram mais comuns na

mineração. Apesar desse equipamento já existir desde 1897, ano em que foi criada a primeira escavadeira totalmente hidráulica que funcionava sem a utilização de cabos na operação, foi apenas em meados de 1950 e 1960 que esse equipamento passou a ganhar mais espaço na indústria. Em 1956 a empresa Marion construiu a primeira grande escavadeira elétrica a cabo de 50 metros cúbicos de capacidade, e no final da década de 1965, a mesma empresa criou o que seria a maior escavadeira já produzida na história, a Marion 6360, de 140 metros cúbicos de capacidade. (ORLEMANN, Eric, 2003; BERRY, Thomas, 2014; WIKIPEDIA, Steam Shovel, 2017; WIKIPEDIA, Power Shovel, 2018).

A partir da década de 1960 grandes empresas começaram a se destacar ainda mais e entraram de vez na indústria de equipamentos de grande porte para a mineração e outras atividades, como foi o caso da Komatsu, que produziu sua primeira escavadeira hidráulica em 1968, e a Hitachi, que produziu seu primeiro modelo de escavadeira hidráulica em 1965 (UH03). No final da década de 1960 e início da década de 1970, as escavadeiras hidráulicas passaram a substituir as escavadeiras a cabo em grande parte das minerações devido à maior flexibilidade operacional. O surgimento de escavadeiras de grande capacidade e mobilidade nos anos 70 levou a mudanças na indústria de mineração, dentre elas a combinação de escavadeiras e caminhões, que se tornou cada vez mais comum nas operações de carregamento e transporte. Por volta dos anos 1990 e 2000, o aumento do preço das commodities minerais proporcionada pelo crescimento de países emergentes como a China, levou a indústria de mineração a grandes resultados econômicos e permitiu que a indústria se desenvolvesse ainda mais, buscando se adaptar a um mercado cada vez mais competitivo e tecnológico (BERRY, Thomas, 2014; HITACHI REVIEW, 2013; KOMATSU HISTORY, 2018).

É importante ressaltar que nem todos os equipamentos de escavação existentes operam exclusivamente na mineração e que, dentre os que operam, nem todos trabalham em conjunto com caminhão na operação de carregamento e transporte. Atualmente, as empresas que mais se destacam na indústria são a Caterpillar, Komatsu, Hitachi, Liebherr e Bucyrus. E as principais escavadeiras hidráulicas e elétricas do mercado que operam em conjunto com caminhões fora de estrada, possuem capacidade que variam entre aproximadamente 7 e 70 metros cúbicos de capacidade. (Caterpillar Performance Handbook, 2014; Komatsu, 2018).

Segundo Barbosa (2016), a automação de escavadeiras nas operações de lavra ainda não é uma realidade, e projetos desse tipo se encontram em fase conceitual. Ao contrário das atividades desempenhadas pelos caminhões, as escavadeiras executam tarefas que não são monótonas ou repetitivas e que, portanto, são mais difíceis de serem automatizadas. O capítulo Anexo ilustra cronologicamente a evolução das escavadeiras ao longo da história da mineração, e as figuras 16 e 17 mostram escavadeiras em diferentes momentos da história da mineração.

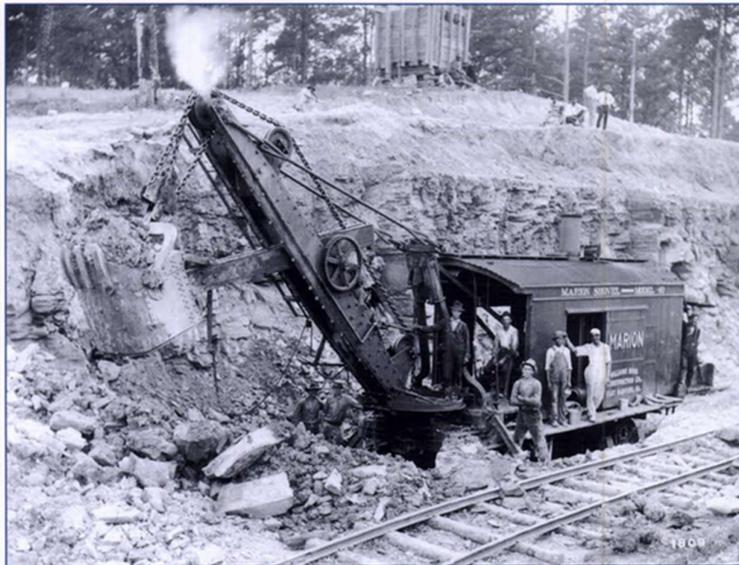


Figura 16: Escavadeira Marion Model 40, inaugurada em 1908.

Fonte: Orlemann (2003)



Figura 17: Escavadeira Hidráulica Komatsu PC8000

Fonte: Pinterest (2018)

Segundo Lopes (2010, *apud* RACIA, 2016), os caminhões tentaram acompanhar o porte das escavadeiras, mas foram limitados pelo tamanho dos pneus. Entretanto, nas últimas décadas, o avanço da tecnologia de fabricação de pneus permitiu que o tamanho de caminhões fosse ampliado até atingir as capacidades produtivas de hoje, e as escavadeiras se adaptaram e passaram a ter tamanhos proporcionais aos caminhões que estão carregando.

Por volta da década de 1920, os caminhões eram construídos com capacidades que variavam entre 1.5 e 7 toneladas, e operavam principalmente com motores movidos a querosene e gasolina. Cerca de uma década depois (em meados da década de 30 e início da década de 40), algumas empresas como Caterpillar, Dart Truck. Co e Terex Trucks, aumentaram a capacidade dos equipamentos, e os caminhões passaram a ter capacidades que variavam entre 18 e 37 toneladas, e um preço estimado em 16 mil dólares. Em 1951 o caminhão Dart 75-TA bateu recorde de capacidade chegando a 75 toneladas. Desde então, a indústria de mineração passou a demandar caminhões com maiores capacidades para transportar minério e estéril. A alta eficiência e produtividade dos caminhões a diesel fizeram com que esses equipamentos se tornassem o método de transporte de material mais usado nas minas a céu aberto em todo o mundo, substituindo gradativamente o

transporte ferroviário na década de 1960. Em meados da década de 1980, caminhões de 170 toneladas já operavam em algumas minas e custavam aproximadamente 750 mil dólares. Em 1998 a Caterpillar revolucionou o ramo da indústria ao lançar o caminhão CAT 797 com capacidade superior a 360 toneladas. Esse caminhão foi por cerca de 15 anos o maior caminhão do mundo, e ainda hoje é amplamente utilizado em diversas operações. Atualmente, o posto de maior caminhão fora de estrada do mundo é do Belaz 75710, construído em 2013 com capacidade de carga de 500 toneladas e preço estimado em 6 milhões de dólares. As principais empresas que se destacam na produção de caminhões fora de estrada são basicamente as mesmas que produzem as principais escavadeiras, Caterpillar, Komatsu, Liebherr, Belaz, Terex, Hitachi, etc. No Brasil, a única empresa nacional fabricante de caminhões fora de estrada é a Randon Perlini (ASCARZA, Willian, 2014; ASCARZA, Willian, 2013; WIKIPEDIA, Haul Trucks).

Segundo Barbosa (2016), a mineração subterrânea sempre esteve à frente das minas a céu aberto com relação ao desenvolvimento tecnológico, e somente nas últimas décadas, as minerações a céu aberto passaram a buscar inovações que não eram economicamente viáveis em momentos anteriores. Ainda segundo a autora, o foco no atendimento a metas de produção e lucratividade ainda são empecilhos para que as operações na mineração se tornem mais automatizadas. Entretanto, nos últimos anos projetos relacionados ao transporte de caminhões autônomos, ou seja, sem um operador, e a eletrificação dos equipamentos de carregamento e transporte tem se tornado comuns no setor. Algumas empresas têm buscado inovações desse tipo visando alcançar soluções de menor custo operacional, maior segurança, e buscando alternativas para sobreviver à alta competitividade e a falta de mão de obra em países desenvolvidos. Uma das empresas pioneiras que se destacou no ramo dos caminhões autônomo e veículos elétricos foi a Komatsu que, em 2008, iniciou a produção de escavadeiras híbridas e iniciou a operação de caminhões autônomos na Austrália, país em que a mão de obra se apresenta como um dos maiores custos operacionais da lavra (Barbosa, 2016; Komatsu History, 2018).

No Brasil, um entrave econômico para o desenvolvimento de frotas automatizadas é a abundância de mão de obra barata. Entretanto, algumas minas no país já começaram a operar com veículos autônomos, como o caso da mina de Brucutu da Vale. De acordo

com a empresa, estima-se que a operação com veículos autônomos aumente em 15% a vida útil dos equipamentos, que haja redução do consumo de combustível e custos de manutenção em 10%, que o desgaste de pneus seja 25% menor, além da redução significativa de emissão de gás carbônico. Em apenas um mês, resultados apontam que houve um aumento de 26% em volume movimentado e que a velocidade média dos equipamentos aumentou de 22,9 para 23,9 km/h (Portal da Mineração, 2018).

A evolução dos veículos de transporte é ilustrada no capítulo de Anexo com figuras de caminhões que evidenciam como os equipamentos se tornaram maiores e com maior aparato tecnológico ao longo dos anos. Abaixo, as figuras 18 e 19 mostram, respectivamente, um caminhão operando em 1916 e um modelo recente de caminhão da Komatsu adaptado para operações sem a necessidade de um operador.



Figura 18: Caminhão de capacidade de 1.6 toneladas operando em 1916 no estado do Arizona, EUA.

Fonte: Ascarza (2014)



Figura 19: Caminhão Komatsu adaptado para operações autônomas.

Fonte: Barbosa (2018)

2.4. O SUPER PIT

O Super Pit é o exemplo mais claro de como o aumento da capacidade dos veículos de carregamento e transporte revolucionou a indústria de mineração a partir do momento que viabilizou projetos de lavra com teores mais baixos, antes impensáveis se serem implementados (JARROD, 2013).

A mina está localizada na cidade de Kalgoorlie no Oeste da Austrália, a aproximadamente 600km de Perth. Atualmente a mina é conhecida como Super Pit, mas sua história remete em 1893, quando Paddy Hannan descobriu 100 onças de ouro em Kalgoorlie, desencadeando uma corrida pelo ouro no oeste da Austrália e a futura descoberta da Golden Mile, um dos maiores depósitos de ouro do mundo. A Kalgoorlie Golden Mile consistia em um agrupamento mineiro composto por aproximadamente 80 pequenas minas, subterrâneas e a céu aberto. Nessa época, as minas operavam com um teor médio de ouro de 34,4 g/t, mas após 70 anos de operação as partes mais ricas foram se exaurindo e o teor médio que passou a ser de 10 g/t e deixou de ser viável economicamente para grande parte das minas do agrupamento (BARBOSA, 2016; SUPERPIT WEBSITE, MINING PEOPLE INTERNATIONAL, 2017; MORRISON, 2015).

Em meados de 1980, o empresário Alan Bond começou a comprar arrendamentos da Golden Mile. Naquela época, a onça do ouro estava na faixa de 350 dólares e o empreendedor viu ali uma grande oportunidade de negócio que consistia em transformar as pequenas minas que ali estavam em uma única grande cava. Naquele momento o empresário não tinha recursos suficientes para viabilizar o empreendimento, e somente em 1989 com a criação de uma *join venture* que o Super Pit foi criado, e o empreendimento conjunto passou a se chamar Kalgoorlie Consolidated Gold Mines (KCGM) (MINING PEOPLE INTERNATIONAL, 2017; SUPERPIT WEBSITE; JARROD, 2013).

Em 2001, 50% da KCGM foi comprada pela Barrick Gold e, em 2002, a Newmont Mining Corporation adquiriu os outros 50% pertencentes à KCGM. Em 2014 celebrou-se 25 anos de história do Super Pit com 16 milhões de onças produzidas desde o seu surgimento em 1989, e cerca de 58 milhões de onças considerando a operação de Golden Mile desse 1893 (SUPERPIT WEBSITE, 2018).

Com uma produção em larga escala, o Super Pit possui hoje uma reserva com um teor médio de 2 g/t. Inicialmente, quando a mina foi adquirida, sua expectativa de vida era até 2003, porém estima-se que a mina continuará lavrando minério até 2019 e com previsão da planta de beneficiamento operar até 2029 beneficiando pilhas de estoque de baixo teor (BARBOSA, 2016; SUPERPIT WEBSITE, 2018).

Atualmente, o Super Pit produz cerca de 700 mil onças de ouro por ano e apresenta aproximadamente 3,5 km de comprimento, 1,5 km de largura e quase 700 m de profundidade, como é ilustrado na figura 21. A frota de equipamentos da mina conta com 40 caminhões fora de estrada (36 CAT 793C e 4 CAT 793F), 6 tratores de esteiras (4 CAT D10T e 2 CAT 854), 4 escavadeiras hidráulicas Komatsu PC8000, 4 caminhões pipa (2 CAT 777B e 2 CAT 785B), 4 retroescavadeiras (3 Komatsu PC1250 e 1 Komatsu PC2000), 1 pá carregadeira Le Tourneaus 1850, e 2 motoniveladoras Caterpillar 16M (SUPERPIT WEBSITE, 2018).



Figura 20: Super Pit, Kalgoorlie, Austrália.

Fonte: Superpit.com (2018)

3. METODOLOGIA

O viés da análise econômica a ser discutida nesse trabalho é fundamentalmente comparativo. A metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo consistiu na realização de um dimensionamento simplificado de frotas de caminhões e escavadeiras hidráulicas de diferentes capacidades, e uma análise econômica a nível de FEL 1 visando levantar custos operacionais relevantes e compará-los para as diferentes frotas dimensionadas.

A metodologia do dimensionamento de frotas não considerou algumas variáveis avançadas de dimensionamento, tais como fator de enchimento da caçamba, fator de empolamento do material, entre outros. O estudo também não levou em consideração fatores limitantes para o dimensionamento, tais como restrições físicas e operacionais da mina, como geometria da bancada, resistência ao rolamento, resistência de rampa, etc. Com relação aos custos operacionais, os principais foram analisados, embora outros custos relevantes não foram contemplados, como por exemplo, custo de manutenção planejada dos veículos de carregamento e transporte.

A mina de Brucutu, localizada em São Gonçalo do Rio Abaixo, cerca de 100 quilômetros de Belo Horizonte, foi a mina selecionada para o desenvolvimento deste trabalho. Brucutu é uma mina de minério de ferro pertencente a Vale e é considerada a segunda maior do Brasil, com produção anual de cerca de 30 milhões de toneladas e uma relação estéril-minério (REM) de cerca de 0,4. (Portal da Mineração, Curso básico de mineração – Módulo II).

Para a determinação da distância média de transporte (DMT) a ser considerada no trabalho, uma imagem do Google Earth (Figura 21) foi usada em que se calculou a distância entre uma frente de lavra até o britador primário e até a pilha de estéril.



Figura 21: Mina de Brucutu, Vale.

Fonte: Google Earth (2018)

A distância determinada pelo programa entre a frente de lavra e o britador primário foi de 1.12 km, e a distância da frente de lavra até a pilha de estéril foi de 2.63 km.

O cálculo da movimentação anual de material na mina foi feito da seguinte maneira:

(I)

$$MT = ROM + (ROM * REM)$$

No qual:

- MT: Movimentação total de material;
- ROM: Movimentação de minério;
- REM: Relação estéril/minério.

A DMT global foi calculada pela seguinte fórmula:

(II)

$$DMT_{global} = \frac{(DMT_{rom} * MASSA_{rom}) + (DMT_{estéril} * MASSA_{estéril})}{Movimentação\ Total}$$

Considerou-se como velocidades de tráfego de caminhões na mina uma velocidade com veículo carregado de 20 km/h, e vazio de 26 km/h. A velocidade média dos caminhões foi calculada da seguinte maneira:

(III)

$$Vm = \frac{(DMT\ m + DMT\ e) * 2}{\frac{DMTm}{Vc} + \frac{DMTm}{Vv} + \frac{DMTe}{Vc} + \frac{DMTe}{Vv}}$$

No qual:

- DMT m: Distância média de transporte de minério;
- DMT e: Distância média de transporte de estéril;
- Vc: Velocidade carregado;
- Vv: Velocidade vazio;
- Vm: Velocidade média.

Segundo Martins (2013) a utilização física média da frota de caminhões de Brucutu é de 86.7%, e a disponibilidade física dos mesmos é de 88,81%. Com essas informações, é possível determinar a eficiência operacional da seguinte maneira:

(IV)

$$EO = UG * DF$$

Em que:

- UG: Utilização Global;
- DF: Disponibilidade Física;
- EO: Eficiência Operacional.

Considerando que a mina opera 24 horas por dia, todos os dias da semana, determinou-se o número de horas trabalhadas por ano através da fórmula:

(V)

$$\frac{h}{ano} = \frac{Turnos}{dia} * \frac{horas}{turno} * \frac{dias}{semana} * EO$$

A movimentação horária de material (tph) foi calculada pela fórmula:

(VI)

$$tph = \frac{Massa\ total\ movimentada\ por\ ano\ (t/ano)}{Horas\ trabalhadas\ por\ ano\ (h/ano)}$$

Os veículos de carregamento e transporte utilizados para o estudo de dimensionamento foram caminhões e escavadeiras hidráulicas da Caterpillar. As capacidades de carregamento e transporte e o modelo dos equipamentos são apresentados nas tabelas a seguir.

Modelo Caminhão	CAT 770	CAT 772	CAT 775	CAT 777	CAT 785	CAT 789	CAT 793	CAT 795	CAT 797
Capacidade (t)	40	50	70	100	150	200	250	345	400
Caçamba (m ³)	25	30	42	62	85	108	170	213	250

Tabela 2: Capacidade dos caminhões fora de estrada Caterpillar

Modelo Escavadeira	CAT 6015	CAT 6018	CAT 6030	CAT 6040	CAT 6050	CAT 6060	CAT 6090
Capacidade (m ³)	7	10	17	22	28	34	52

Tabela 3: Capacidade das escavadeiras hidráulicas Caterpillar

O tempo de ciclo de caminhões leva em consideração o tempo que o caminhão levou para transportar o material ao local de descarga (T_c), o tempo gasto para retornar vazio até o local de carregamento (T_v), e tempos fixos gastos em filas, manobras, posicionamento, carregamento e basculamento (T_f). O T_f considerado para todas as frotas foi de 12 minutos, considerado um tempo aceitável para essas atividades citadas.

Assim, o cálculo do tempo de ciclo dos caminhões levando em consideração a DMT e a velocidade média de transporte foi calculado da seguinte maneira:

$$(VII)$$

$$TC = \frac{DMT}{Vm} * 2 + Tf$$

Em que:

- TC : Tempo de ciclo;
- DMT : Distância média de transporte;
- V_m : Velocidade média;
- T_f : Tempos fixos

Para determinar teoricamente a quantidade de caminhões necessários para operar na mina de Brucutu considerando a movimentação horária de material, a seguinte sequência de cálculos foi realizada:

- Número de viagens por hora:

$$(VIII)$$
$$N^{\circ} \text{ de viagens por hora} = \frac{\text{Capacidade do caminhão}}{\text{Movimentação horária de material}}$$

- Ciclos por hora:

$$(IX)$$
$$\text{Ciclos por hora} = \frac{60 \text{ (min)}}{\text{Tempo de Ciclo caminhão (min)}}$$

- Número de caminhões:

$$(X)$$
$$N^{\circ} \text{ de caminhões} = \frac{N^{\circ} \text{ de viagens por hora}}{\text{Ciclos por hora}}$$

Para uma escavadeira, o tempo de ciclo normalmente consiste na soma dos tempos de carregamento, tempo de rotação da caçamba carregada, tempo de basculamento e tempo de rotação da caçamba descarregada. O tempo total de ciclo da escavadeira também é conhecido como de tempo de passe, e irá depender do tamanho da máquina, das condições operacionais e da habilidade do operador. De acordo com a Caterpillar, o tempo de ciclo de determinada escavadeira pode variar dependendo das seguintes condições:

- Condições ideais de carregamento: Material solto, solo, sem esforço para alcançar um bom enchimento da caçamba. A pá consegue penetrar facilmente no material.
- Condições moderadas de carregamento: Material macio com baixo grau de compactação e bom grau de fragmentação. Operador não precisa preocupar em escolher o melhor local para escavar.
- Condições moderadas de escavação: Solo mais duro ou compactado requerendo do operador mais esforço para encher a caçamba corretamente.
- Condições de escavação severas: Rocha não homogênea com presença de fragmentos de rochas maiores. Considerável esforço para romper o material.

Para o presente trabalho, considerou-se a condição moderada de escavação. A tabela 4 informa o tempo de passe de escavadeiras hidráulicas em diferentes condições de operação.

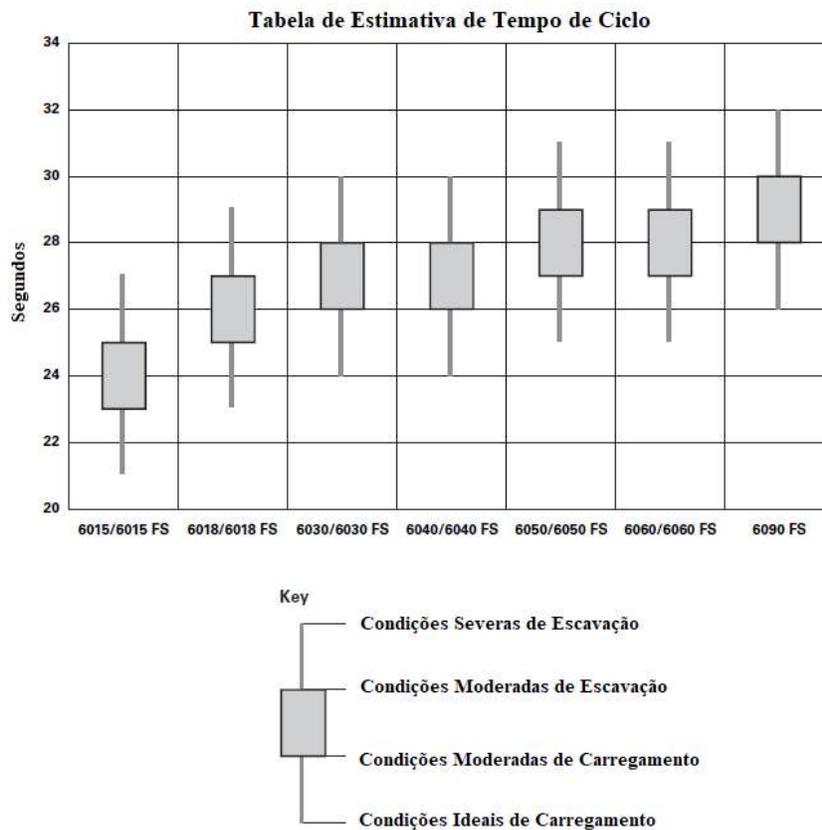


Tabela 4: Tabela de estimativa de tempo de ciclo de escavadeiras hidráulicas.

Para calcular a quantidade de escavadeiras foi realizado a seguinte sequência de cálculos:

Nº de passes por caminhão:

$$(XI)$$
$$N^{\circ} \text{ de passes} = \frac{\text{Capacidade do caminhão (m}^3\text{)}}{\text{Capacidade da escavadeira (m}^3\text{)}}$$

Tempo de carregamento:

$$(XII)$$
$$T \text{ carregamento} = \text{Tempo por passe} * N^{\circ} \text{ de passes}$$

Número de carregamentos por hora:

$$(XIII)$$
$$N^{\circ} \text{ de carregamentos} = \frac{3600 \text{ (s)}}{\text{Tempo de carregamento (s)}}$$

Número de escavadeiras:

$$(XIV)$$
$$N^{\circ} \text{ de escavadeiras} = \frac{N^{\circ} \text{ de viagens por hora}}{N^{\circ} \text{ de carregamentos por hora}} * 1.3$$

O fator de 1.3 acrescentado ao cálculo do número de escavadeiras é uma estimativa razoável a ser considerada quando não houver informações suficientes para estimar de maneira precisa os tempos perdidos nos carregamentos associados às manobras dos caminhões e ao reposicionamento da máquina.

Após determinar a quantidade de escavadeiras necessárias para cada frota de caminhões, foi preciso definir se determinada escavadeira é ou não compatível com determinado

modelo de caminhão. A definição das combinações entre os veículos de carregamento e transporte foi determinada pelo número de passes necessários para encher um caminhão. Considerou-se que uma escavadeira seria compatível com um modelo de caminhão caso fosse capaz de enche-lo com 3 a 5 passes, quantidade que representa um bom equilíbrio convencionalmente.

Na determinação de custos operacionais, para o salário de um operador foi considerado o valor de 3 mil reais e um fator sobre o salário de 2.5 (referência de pessoas da área), considerando todos os auxílios indiretos como vale alimentação, seguro de vida, plano funerário, plano de saúde, férias, 13º salário, entre outros. Considerou-se também que, em média, cada operador trabalha cerca de 22 dias ao mês. A determinação do custo de operadores das frotas por hora trabalhada, foi realizada da seguinte maneira:

(XV)

$$\text{Custo dos Operadores} = N^{\circ} \text{ de operadores} * \frac{S * F}{D * h}$$

No qual:

- S: Salário do operador;
- F: Fator sobre o salário;
- D: Dias trabalhados por mês;
- h: Horas trabalhadas por dia.

O Manual de Desempenho da Caterpillar (2012) e o Caterpillar Performance Handbook (2014) informam os consumos de combustível de cada um dos modelos de caminhões e escavadeiras hidráulicas. Tanto para as escavadeiras quanto para os caminhões, o consumo pode variar entre baixo, médio e alto.

Escavadeiras hidráulicas:

- Baixo consumo: Trabalho leve com quantidade considerável de marcha lenta.
- Médio consumo: Operações de carregamento contínuo com períodos de inatividade. (Aplica-se à grande parte das aplicações)

- Alto consumo: Operações contínuas de dura escavação com períodos de marcha lenta raros.

Caminhões fora de estrada:

- Baixo consumo: Operação contínua com peso bruto médio inferior ao recomendado. Excelentes condições das vias de transporte, e baixo fator de carga.
- Médio consumo: Operação contínua com aproximação de peso bruto próxima à recomendada. Boas condições das vias de transporte e fator de carga moderado.
- Alto consumo: Operação contínua no peso bruto máximo recomendado ou acima disso. Condições ruins das estradas e alto fator de carga.

Para o cálculo do consumo de diesel de cada modelo de caminhão e escavadeira, considerou-se o fator de consumo médio e realizou-se a média entre os valores apresentados para esse fator. A unidade considerada para o cálculo foi o litro e o preço do diesel considerado no cálculo dos custos foi de R\$ 3.55/litro. Dessa forma, o cálculo dos custos de combustível das frotas de caminhões e escavadeiras foi feito da seguinte maneira:

$$\text{Custo de Combustível} = N^{\circ} \text{ de Veículos} * \text{Consumo} \left(\frac{\text{litros}}{\text{hora}} \right) * \text{Preço do diesel} \left(\frac{\text{R\$}}{\text{Litro}} \right)$$

As tabelas 5 e 6 mostram, respectivamente, o consumo de combustível por hora trabalhada de escavadeiras hidráulicas de carregamento frontal e caminhões da Caterpillar.

Escavadeiras Hidráulicas						
Modelo	Baixo		Moderado		Alto	
	Litro	U.S. gal	Litro	U.S. gal	Litro	U.S. gal
6015/6015 FS	66-80	17-21	80-93	21-25	93-106	25-28
6018/6018 FS	105-126	28-33	126-147	33-39	147-168	39-44
6030/6030 FS	134-161	35-43	161-188	43-50	188-215	50-57
6040/6040 FS	180-216	48-57	216-252	57-67	252-288	67-76
6050/6050 FS	229-275	60-73	275-321	73-85	321-367	85-97
6060/6060 FS	276-331	73-87	331-387	87-102	387-442	102-117
6090 FS	402-483	106-128	483-563	128-149	563-644	149-170

Tabela 5: Consumo de combustível de escavadeiras hidráulicas.

Fonte: CAT Performance Handbook (2014)

CAMINHÕES FORA DE ESTRADA						
Modelo	Baixa		Médias		Alta	
	litro	Gal EUA	litro	Gal EUA	litro	Gal EUA
770	20,4-30,6	5,4-8,1	30,6-40,8	8,1-10,8	40,8-51	10,8-13,5
770G	18,3-27,5	4,8-7,3	27,5-36,6	7,3-9,7	36,6-45,8	9,7-12,1
772	23,6-35,3	6,2-9,3	35,3-47,1	9,3-12,4	47,1-58,9	12,4-15,6
772G	22-32,9	5,8-8,7	32,9-43,9	8,7-11,6	43,9-54,9	11,6-14,5
773E	27,4-41,2	7,2-10,9	41,2-54,9	10,9-14,5	54,9-68,6	14,5-18,1
773G	29,0-43,5	7,7-11,5	43,5-58	11,5-15,3	58-72,5	15,3-19,2
773G Camada 4f	29,0-43,5	7,7-11,5	43,5-58,1	11,5-15,4	58,1-72,6	15,4-19,2
775G	30,9-46,3	8,2-12,2	46,3-61,7	12,2-16,3	61,7-77,1	16,3-20,4
775G Camada 4f	30,9-46,4	8,2-12,3	46,4-61,9	12,3-16,4	61,9-77,4	16,4-20,4
777D	37,5-56,3	9,9-14,9	56,3-75	14,9-19,8	75-93,8	19,8-24,8
777G	37,5-56,2	9,9-14,8	56,2-75	14,8-19,8	75-93,7	19,8-24,8
777G Camada 4f	38,7-58	10,2-15,3	58-77,4	15,3-20,4	77,4-96,7	20,4-25,5
785C	53,7-80,6	14,2-21,3	80,6-107,5	21,3-28,4	107,5-134,4	28,4-35,5
785D	54,2-81,4	14,3-21,5	81,4-108,5	21,5-28,7	108,5-135,6	28,7-35,8
789C	70,6-105,9	18,7-28	105,9-141,2	28-37,3	141,2-176,5	37,3-46,6
793D	90,8-136,2	24-36	136,2-181,6	36-48	181,6-227	48-60
793F	96,7-145	25,5-38,3	145-193,3	38,3-51,1	193,3-241,7	51,1-63,9
793F HAA	90,7-136	24-35,9	136-181,4	35,9-47,9	181,4-226,7	47,9-59,9
795F	123,3-184,9	32,6-48,9	184,9-246,6	48,9-65,2	246,6-308,2	65,2-81,4
797F	146,8-220,3	38,8-58,2	220,3-293,7	58,2-77,6	293,7-367,1	77,6-97
797F HAA	147,9-221,8	39,1-58,6	221,8-295,8	58,6-78,2	295,8-369,7	78,2-97,7

Tabela 6: Consumo de combustível de caminhões fora de estrada.

Fonte: Manual de desempenho Caterpillar (2012)

O consumo de pneus dos caminhões é outro fator de extrema importância a ser considerado nos custos operacionais da operação de transporte em minas a céu aberto. Na determinação dos custos de pneu para cada modelo de caminhão fora de estrada, utilizou-se como referência pneus da marca Michelin do site Otrusa, que informa o preço de cada modelo de pneu utilizado pelos caminhões fora de estrada. Considerou-se também que cada pneu teria 3 vidas úteis, sendo a primeira vida útil de 3000 horas, a segunda de 2000 horas e a terceira de 1745 horas. Para determinar o custo de reparo dos pneus após cada vida útil, considerou-se como premissa, o valor de 30% sobre o custo total da troca por pneus novos.

Com o resultado do cálculo do número de horas trabalhadas ao ano por cada caminhão, considerou-se que os pneus de cada veículo passassem por 3 reparos anuais e fossem trocados uma vez no final do ano. Para o cálculo referente a gastos com pneus, o fator de conversão de dólar para real considerado foi de 3.8.

(XVI)

$$\text{Custo de Pneu} \left(\frac{R\$}{h} \right) = N^{\circ} \text{ de caminhões} * \frac{\text{Custo de reparo} + \text{Custo de troca}}{N^{\circ} \text{ de horas trabalhadas}}$$

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do estudo de dimensionamento de frota e do cálculo dos custos operacionais envolvidos em cada frota dimensionada. São apresentados também os dados calculados que serviram de input para a realização do trabalho. A apresentação dos resultados será dividida em três tópicos: Inputs, dimensionamento de frota e análise econômica.

- Inputs: Os dados que serviram como base de cálculo para o dimensionamento e para a análise econômica são apresentados a seguir em forma de tabela.

Dados Gerais	
REM	0.4
Utilização Global	87%
Disponibilidade Física	89%
Eficiência Operacional	77%

Movimentação Total da Mina (t/ano)	
ROM	30,000,000
Estéril	12,000,000
Total Movimentado	42,000,000

Velocidades Permitidas (Km/h)	
Velocidade Carregado	20
Velocidade Vazio	26
Velocidade Média	22.6

Tabela 7: Tabela de Inputs - Dados gerais, movimentação de mina e velocidades de tráfego de caminhões

Distâncias Médias de Transporte - DMT (Km)	
Distancia Mina - Usina	1.12
Distancia Mina - Pilha	2.63
DMT global	1.55
Taxa de Produção (t)	
Movimentação Anual	42,000,000
Movimentação Mensal	3,500,000
Movimentação Diária	115,068
Movimentação Horária	6,227
Regime de Trabalho	
Turnos	3
Horas/turno	8
Dias na semana	7
Horas/ano	8,760
Horas Trabalhadas/ano	6,745

Tabela 8: Tabela de Input - DMT, taxa de produção e regime de trabalho

- Dimensionamento de frotas: Através da metodologia detalhada no capítulo anterior, foi possível selecionar as combinações viáveis de caminhões e escavadeiras, e determinar a quantidade de veículos de tamanhos variados necessários para atender a demanda de produção da mina analisada. Os resultados são apresentados nas tabelas a seguir.

A tabela 9 mostra a quantidade mínima de caminhões de diferentes modelos necessários para atender a produção diária da mina de Brucutu.

Modelo Caminhão	CAT 770	CAT 772	CAT 775	CAT 777	CAT 785	CAT 789	CAT 793	CAT 795	CAT 797
Capacidade (t)	40	50	70	100	150	200	250	345	400
Caçamba (m³)	25	30	42	62	85	108	170	213	250
DMT (Km)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
Velocidade Média (Km/h)	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6	22.6
Paradas por Ciclo (min)	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Tempo de Ciclo (min)	20.23	20.23	20.23	20.23	20.23	20.23	20.23	20.23	20.23
N° de Viagens por hora	155.67	124.54	88.95	62.27	41.51	31.13	24.91	18.05	15.57
Ciclos por hora	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97
N° de Caminhões	53.0	42.0	30.0	21.0	14.0	11.0	9.0	7.0	6.0

Tabela 9: Cálculo da quantidade de caminhões fora de estrada Caterpillar

A partir da tabela 10 apresentada abaixo, foi possível determinar o tempo de ciclo das escavadeiras escolhidas para o estudo em questão. Vale ressaltar que a determinação do tempo de ciclo considerou que as escavadeiras trabalhariam na condição moderada de escavação, como explica o manual da Caterpillar.

Modelo Escavadeira	CAT-6015	CAT-6018	CAT-6030	CAT-6040	CAT-6050	CAT-6060	CAT-6090
Capacidade (m ³)	7	10	17	22	28	34	52
Tempo de Passe (s)	25	27	28	28	29	29	30

Tabela 10: Tempo de ciclo escavadeiras hidráulicas Caterpillar em regime de trabalho moderado

Com a definição dos parâmetros de operação dos caminhões e escavadeiras, foi possível calcular o número de escavadeiras de diferentes tamanhos necessárias para cada modelo de caminhão considerado. A sequência de cálculos foi detalhada na metodologia, e os resultados são apresentados nas tabelas 11 e 12.

Escavadeira/Caminhão	CAT 770	CAT 772	CAT 775	CAT 777	CAT 785	CAT 789	CAT 793	CAT 795	CAT 797
Nº de Passes/Caminhão									
CAT-6015	3.6	4.3	6.0	8.9	12.1	15.4	24.3	30.4	35.7
CAT-6018	2.5	3.0	4.2	6.2	8.5	10.8	17.0	21.3	25.0
CAT-6030	1.5	1.8	2.5	3.6	5.0	6.4	10.0	12.5	14.7
CAT-6040	1.1	1.4	1.9	2.8	3.9	4.9	7.7	9.7	11.4
CAT-6050	0.9	1.1	1.5	2.2	3.0	3.9	6.1	7.6	8.9
CAT-6060	0.7	0.9	1.2	1.8	2.5	3.2	5.0	6.3	7.4
CAT-6090	0.5	0.6	0.8	1.2	1.6	2.1	3.3	4.1	4.8
Tempo de Carregamento (s)									
CAT-6015	89.3	107.1	150.0	221.4	303.6	385.7	607.1	760.7	892.9
CAT-6018	67.5	81.0	113.4	167.4	229.5	291.6	459.0	575.1	675.0
CAT-6030	41.2	49.4	69.2	102.1	140.0	177.9	280.0	350.8	411.8
CAT-6040	31.8	38.2	53.5	78.9	108.2	137.5	216.4	271.1	318.2
CAT-6050	25.9	31.1	43.5	64.2	88.0	111.9	176.1	220.6	258.9
CAT-6060	21.3	25.6	35.8	52.9	72.5	92.1	145.0	181.7	213.2
CAT-6090	14.4	17.3	24.2	35.8	49.0	62.3	98.1	122.9	144.2

Tabela 11: Número de passes por caminhão e tempo de carregamento dos conjuntos de caminhões e escavadeiras

Escavadeira/Caminhão	CAT 770	CAT 772	CAT 775	CAT 777	CAT 785	CAT 789	CAT 793	CAT 795	CAT 797
Nº de Carregamentos/Hora									
CAT-6015	40.3	33.6	24.0	16.3	11.9	9.3	5.9	4.7	4.0
CAT-6018	53.3	44.4	31.7	21.5	15.7	12.3	7.8	6.3	5.3
CAT-6030	87.4	72.9	52.0	35.3	25.7	20.2	12.9	10.3	8.7
CAT-6040	113.1	94.3	67.3	45.6	33.3	26.2	16.6	13.3	11.3
CAT-6050	139.0	115.9	82.8	56.1	40.9	32.2	20.4	16.3	13.9
CAT-6060	168.8	140.7	100.5	68.1	49.7	39.1	24.8	19.8	16.9
CAT-6090	249.6	208.0	148.6	100.6	73.4	57.8	36.7	29.3	25.0
Nº de Escavadeiras									
CAT-6015	6	5	5	5	5	5	6	5	6
CAT-6018	4	4	4	4	4	4	5	4	4
CAT-6030	3	3	3	3	3	2	3	3	3
CAT-6040	2	2	2	2	2	2	2	2	2
CAT-6050	2	2	2	2	2	2	2	2	2
CAT-6060	2	2	2	2	2	2	2	2	2
CAT-6090	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 12: Número de carregamentos por hora e número de escavadeiras necessárias para cada modelo de caminhão

Considerando que uma escavadeira só é considerada compatível com o caminhão se conseguir enchê-lo em 3 a 5 passadas, determinou-se as frotas de caminhões e escavadeiras a serem utilizados na análise de custo operacional. A tabela 13 mostra os conjuntos de caminhões e escavadeiras considerados compatíveis para o presente trabalho. Cabe notificar que é uma boa prática considerar um número inteiro de passes por escavadeira, todavia, se tratando de um estudo meramente comparativo, considerou-se valores decimais.

Escavadeira/Caminhão	CAT 770	CAT 772	CAT 775	CAT 777	CAT 785	CAT 789	CAT 793	CAT 795	CAT 797
Seleção das Combinações Caminhão/Escavadeira de 3 a 5 passadas									
CAT-6015	3.6	4.3							
CAT-6018		3.0	4.2						
CAT-6030				3.6	5.0				
CAT-6040					3.9	4.9			
CAT-6050					3.0	3.9			
CAT-6060						3.2	5.0		
CAT-6090							3.3	4.1	4.8

Tabela 13: Relação das combinações de caminhões e escavadeiras que trabalham entre 3 e 5 passes.

- **Análise Econômica:** Com a determinação da quantidade e dos conjuntos de caminhões e escavadeiras compatíveis, foi possível realizar uma análise econômica comparando os custos operacionais para cada conjunto de frotas de

diferentes capacidades. Os resultados são apresentados nas tabelas e gráficos a seguir.

A tabela 14 mostra a quantidade de operadores por turno necessários para cada conjunto de frotas e o consumo de diesel das escavadeiras e dos caminhões de cada uma das frotas dimensionadas.

Conjunto de Frotas	Modelo Caminhão	Modelo Escavadeira	Nº de Caminhões	Nº de Escavadeiras	Nº Operadores/turno	Consumo de Diesel por Caminhão (l/h)	Consumo de Diesel por Escavadeira (l/h)
1	CAT 770	CAT-6015	53.00	6	59.0	22.9	73
2	CAT 772	CAT-6015	42.00	5	47.0	27.45	73
3	CAT 772	CAT-6018	42.00	4	46.0	27.45	115.5
4	CAT 775	CAT-6018	30.00	4	34.0	38.75	115.5
5	CAT 777	CAT-6030	21.00	3	24.0	46.85	147.5
6	CAT 785	CAT-6030	14.00	3	17.0	67.15	147.5
7	CAT 785	CAT-6040	14.00	2	16.0	67.15	198
8	CAT 785	CAT-6050	14.00	2	16.0	67.15	252
9	CAT 789	CAT-6040	11.00	2	13.0	90.95	198
10	CAT 789	CAT-6050	11.00	2	13.0	90.95	252
11	CAT 789	CAT-6060	11.00	2	13.0	90.95	303.5
12	CAT 793	CAT-6060	9.00	2	11.0	117.17	303.5
13	CAT 793	CAT-6090	9.00	1	10.0	117.17	442.5
14	CAT 795	CAT-6090	7.00	1	8.0	154	442.5
15	CAT 797	CAT-6090	6.00	1	7.0	183.55	442.5

Tabela 14: Consumo de diesel de caminhões e escavadeiras e número de operadores por turno

A tabela 15 informa os preços de pneu de cada modelo de caminhão fora de estrada, as vidas úteis de cada pneu, e os custos de cada reparo.

Modelo de Caminhão	CAT 770	CAT 772	CAT 775	CAT 777	CAT 785	CAT 789	CAT 793	CAT 795	CAT 797
Nº de Caminhões	53.00	42.00	30.00	21.00	14.00	11.00	9.00	7.00	6.00
Nº de pneus/caminhão	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Pneu Novo (US\$)	\$ 4,500.00	\$ 6,500.00	\$ 8,500.00	\$ 15,500.00	\$ 26,000.00	\$ 28,750.00	\$ 45,500.00	\$ 46,250.00	\$ 47,000.00
Custo do Conjunto (US\$)	\$ 27,000.00	\$ 39,000.00	\$ 51,000.00	\$ 93,000.00	\$ 156,000.00	\$ 172,500.00	\$ 273,000.00	\$ 277,500.00	\$ 282,000.00
1ª Vida Útil (h)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Custo 1ª Reforma	\$ 8,100.00	\$ 11,700.00	\$ 15,300.00	\$ 27,900.00	\$ 46,800.00	\$ 51,750.00	\$ 81,900.00	\$ 83,250.00	\$ 84,600.00
2ª Vida Útil (h)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Custo 2ª Reforma	\$ 8,100.00	\$ 11,700.00	\$ 15,300.00	\$ 27,900.00	\$ 46,800.00	\$ 51,750.00	\$ 81,900.00	\$ 83,250.00	\$ 84,600.00
3ª Vida Útil (h)	1745	1745	1745	1745	1745	1745	1745	1745	1745
Custo 3ª Reforma	\$ 8,100.00	\$ 11,700.00	\$ 15,300.00	\$ 27,900.00	\$ 46,800.00	\$ 51,750.00	\$ 81,900.00	\$ 83,250.00	\$ 84,600.00

Tabela 15: Relação dos preços e dos custos de reforma dos pneus para modelos de caminhão Caterpillar em Real

Conhecendo a quantidade de equipamentos por frota e, conseqüentemente, a quantidade de operadores necessários para operar os equipamentos, e sabendo do consumo de combustível dos veículos e dos gastos referentes ao consumo de pneus dos caminhões,

foi possível determinar os custos operacionais totais da operação de carregamento e transporte para cada frota dimensionada. Os resultados são apresentados na tabela 16.

<i>Combinações</i>	<i>Custo Diesel Total dos Caminhões (\$/h)</i>	<i>Custo Diesel Total das Escavadeiras (\$/h)</i>	<i>Custo de Operador (\$/h)</i>	<i>Custo de Pneu por Frota de Caminhão (\$/h)</i>	<i>Custo Operacional Total (\$/h)</i>	<i>Custo TOTAL (\$/t)</i>
CAT-770 CAT-6015	\$ 4,308.64	\$ 1,554.90	\$ 2,513.99	\$ 1,531.76	\$ 9,909.29	\$ 1.59
CAT-772 CAT-6015	\$ 4,092.80	\$ 1,295.75	\$ 2,002.67	\$ 1,753.34	\$ 9,144.55	\$ 1.47
CAT-772 CAT-6018	\$ 4,092.80	\$ 1,640.10	\$ 1,960.06	\$ 1,753.34	\$ 9,446.29	\$ 1.52
CAT-775 CAT-6018	\$ 4,126.88	\$ 1,640.10	\$ 1,448.74	\$ 1,637.73	\$ 8,853.45	\$ 1.42
CAT-777 CAT-6030	\$ 3,492.67	\$ 1,570.88	\$ 1,022.64	\$ 2,090.52	\$ 8,176.70	\$ 1.31
CAT-785 CAT-6030	\$ 3,337.36	\$ 1,570.88	\$ 724.37	\$ 2,337.79	\$ 7,970.39	\$ 1.28
CAT-785 CAT-6040	\$ 3,337.36	\$ 1,405.80	\$ 681.76	\$ 2,337.79	\$ 7,762.70	\$ 1.25
CAT-785 CAT-6050	\$ 3,337.36	\$ 1,789.20	\$ 681.76	\$ 2,337.79	\$ 8,146.10	\$ 1.31
CAT-789 CAT-6040	\$ 3,551.60	\$ 1,405.80	\$ 553.93	\$ 2,031.11	\$ 7,542.44	\$ 1.21
CAT-789 CAT-6050	\$ 3,551.60	\$ 1,789.20	\$ 553.93	\$ 2,031.11	\$ 7,925.84	\$ 1.27
CAT-789 CAT-6060	\$ 3,551.60	\$ 2,154.85	\$ 553.93	\$ 2,031.11	\$ 8,291.49	\$ 1.33
CAT-793 CAT-6060	\$ 3,743.58	\$ 2,154.85	\$ 468.71	\$ 2,630.01	\$ 8,997.15	\$ 1.44
CAT-793 CAT-6090	\$ 3,743.58	\$ 1,570.88	\$ 426.10	\$ 2,630.01	\$ 8,370.57	\$ 1.34
CAT-795 CAT-6090	\$ 3,826.90	\$ 1,570.88	\$ 340.88	\$ 2,079.28	\$ 7,817.94	\$ 1.26
CAT-797 CAT-6090	\$ 3,909.62	\$ 1,570.88	\$ 298.27	\$ 1,811.14	\$ 7,589.90	\$ 1.22

Tabela 16: Custos operacionais de cada conjunto de frota de caminhões e escavadeiras em Real

A partir dos resultados obtidos, foi possível criar uma série de gráficos que comparassem os custos operacionais das frotas de veículos de diferentes capacidades, deixando a análise mais visual e conseqüentemente mais fácil de realizar comparações. Os gráficos obtidos são apresentados a seguir.

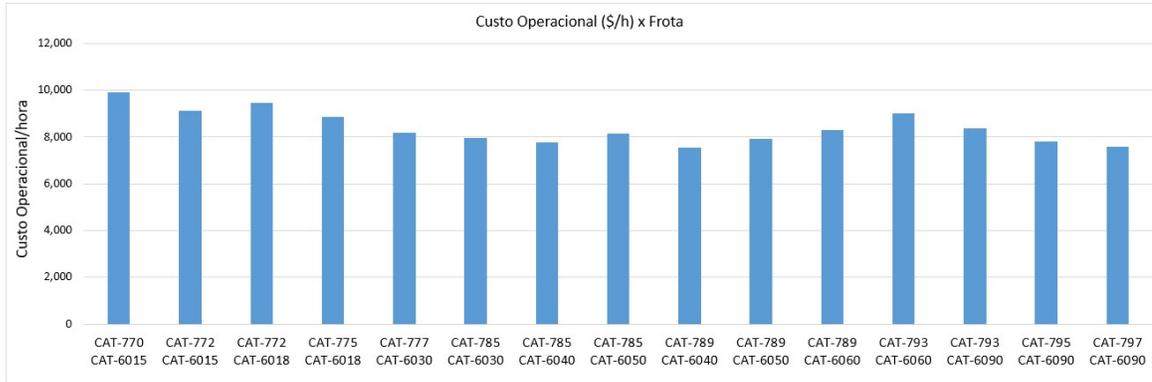


Gráfico 1: Custo operacional total por hora trabalhada (R\$/h)

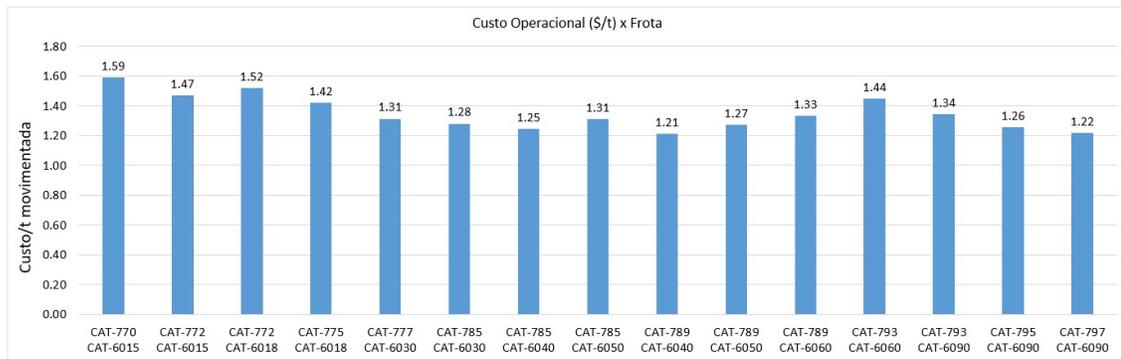


Gráfico 2: Custo operacional total por tonelada movimentada (R\$/t)

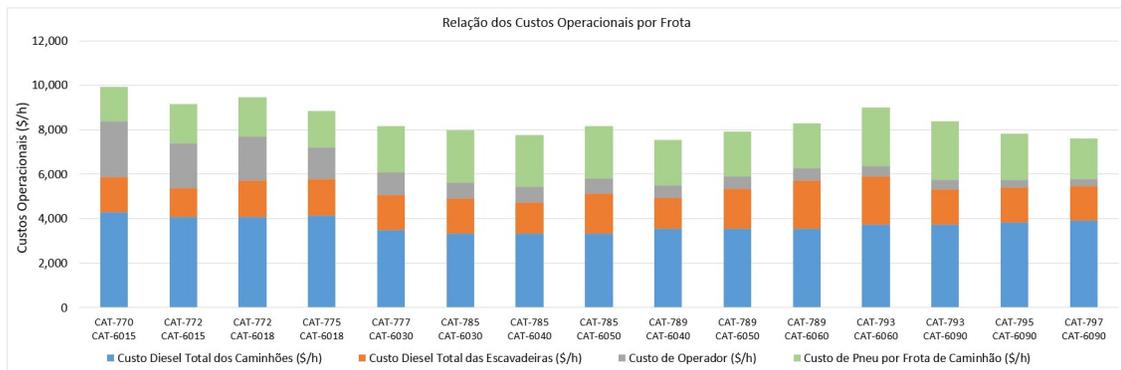


Gráfico 3: Influência de cada custo individual no custo operacional total (R\$/h)



Gráfico 4: Porcentagem dos custos operacionais nas frotas de caminhões e escavadeiras de pequeno a médio porte



Gráfico 5: Porcentagem dos custos operacionais nas frotas de caminhões e escavadeiras de grande porte

Os gráficos mostram que o consumo de diesel dos caminhões fora de estrada representam no geral a maior porcentagem do custo operacional total da operação de carregamento e transporte. Esse custo variou entre 41% e 51% no levantamento dos custos por frota analisada. Para as frotas de caminhão de menor porte, como já era esperado, o custo de operador representou uma grande parcela nos custos totais. Para a combinação de menor porte, esse custo representou 25% do custo operacional total, enquanto para a frota de maior porte, esse custo representou apenas 4% do custo total.

Um ponto interessante é observado quando se analisa o custo de pneu entre as frotas estudadas. Observou-se que apesar do número de caminhões ser reduzido nas frotas de maior porte, o custo de pneu é mais elevado. Isso mostra que apesar do número menor de pneus a serem restaurados e trocados, o custo do reparo e da troca de um pneu de um caminhão fora de estrada de grande porte é significativamente maior do que um fora de estrada de pequeno porte.

De maneira geral, observou-se que comparando frotas de porte menor, como por exemplo, caminhões de 40, 50, e 70 toneladas, os custos operacionais totais foram maiores do que as frotas dimensionadas que possuíam caminhões de maior porte, acima de 100 toneladas.

A mina de Brucutu atualmente conta com a seguinte frota de veículos (Portal da Mineração, Curso básico de mineração – Módulo II):

- 15 Caminhões fora de estrada de 793;
- 6 Carregadeiras com caçamba (pá carregadeira) com capacidade para 38 toneladas;
- 1 Escavadeira hidráulica com capacidade para 55 toneladas;
- 4 Caminhões Pipa;
- 7 Tratores de esteira;
- 2 Tratores de rodas;
- 4 Motoniveladoras.

Nota-se que a frota de veículos de carregamento e transporte da mina de Brucutu não se enquadra na frota de menor custo operacional do estudo realizado. Além disso, a frota de Brucutu possui 15 caminhões CAT 793, enquanto o dimensionamento indicou apenas 9 caminhões desse mesmo modelo. Brucutu ainda conta como principal equipamento de carregamento de material, as pás carregadeiras, que não foram contempladas no dimensionamento no presente trabalho.

Sendo assim, é interessante destacar que o dimensionamento realizado no estudo considerou a quantidade mínima necessária de equipamentos para atender a demanda de movimentação de material da mina. Não foi levado em consideração possíveis falhas nos

equipamentos não planejados durante a operação. Além disso, a quantidade e o modelo de veículos de uma mina sofrem constantes reavaliações ao longo da vida do empreendimento, uma vez que o alto dinamismo do planejamento de mina faz com que as distâncias de transporte e a produtividade sejam fatores suscetíveis a mudanças. Concomitantemente, como já mencionado no trabalho, restrições operacionais como fatores climáticos, geológicos, geométricos, entre outros, bem como fatores econômicos, têm grande influência na tomada de decisão sobre a escolha da frota de equipamentos de um empreendimento. Dessa forma, é aceitável a não concordância entre os resultados obtidos com a atual frota de Brucutu.

5. CONCLUSÕES

A indústria de mineração vivenciou grandes transformações ao longo de sua história e vem ainda buscando se adaptar a uma nova realidade em que a busca por novas tecnologias e, acima de tudo, aumento de produtividade e redução de custos, continua ainda mais forte. Esse trabalho buscou discorrer sobre a atual conjuntura da operação de carregamento e transporte em minas a céu aberto, analisando a evolução dos principais veículos (caminhões e escavadeiras) dessa operação ao longo do tempo e o impacto dessa evolução nos custos operacionais da atividade. Foi possível observar que os veículos de carregamento e transporte se tornaram cada vez maiores e mais modernos no decorrer dos anos, e o aumento da capacidade de movimentação de material proporcionou maior produtividade e reduziu custos operacionais aos empreendimentos mineiros. Os resultados mostraram que o custo de diesel dos caminhões é o maior entre todos os custos operacionais, e que o custo de salário de operador tem um impacto maior nas frotas de pequeno porte, fazendo com que seja interessante um maior investimento na automação de frotas de menor porte. O estudo realizado não teve a intenção de obter resultados concordantes com a atual frota da Mina de Brucutu, visto que não se considerou fatores como flexibilidade operacional, manutenção, entre outros fatores operacionais e econômicos. Dessa forma, o aumento de produção e redução de custos concomitantemente com a evolução das técnicas de processamento mineral, foram primordiais para que novos projetos em todo o mundo se tornassem viáveis economicamente. É primordial salientar que o aumento de porte dos equipamentos em um empreendimento não necessariamente está associado a redução de custos e aumento de produtividade. Cada mina possui suas particularidades e restrições, sejam elas físicas,

ambientais, econômicas, geológicas, etc. Sendo assim, é indispensável um bom estudo do empreendimento para a tomada de decisão acertada sobre a escolha do porte dos equipamentos em uma mina.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho em questão visou levantar um panorama histórico da evolução de caminhões e escavadeiras nas operações de lavra a céu aberto, bem como realizar um estudo de seleção de porte a nível de FEL 1 para uma mina selecionada. Recomenda-se que trabalhos futuros possam detalhar mais o trabalho realizado, contemplando outros custos operacionais não abordados e realizar simulações dinâmicas buscando identificar possíveis gargalos na operação para que o estudo fique mais completo, dinâmico e confiável.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, Rodrigo; MAGALHÃES, Breno. **Redução de porte com ganho de produtividade de equipamentos de mina**. Revista Minérios e Minerales. 2016.

BARBOSA, Viviane. Uma breve revisão da história recente da automação nas operações de lavra. Trabalho para a disciplina “Lavra Subterrânea” do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da UFOP. 2017.

BLOG DO CAMINHONEIRO. **Vale começa a operar a primeira mina do país com caminhões autônomos**. Disponível em: <<https://blogdocaminhoneiro.com/2018/09/vale-comeca-a-operar-a-primeira-mina-do-pais-com-caminhoes-autonomos/>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

CATERPILLAR, A Reference Guide to Mining Machine Applications. 2009.

CATERPILLAR, Manual de desempenho. 42ª edição, Peoria Illinois, USA. 2012.

CATERPILLAR, Performance Handbook. 44ª edition, Peoria Illinois, USA. 2014.

GIGANTES DO MUNDO. **A maior escavadeira do mundo**. Disponível em: <<https://gigantesdomundo.blogspot.com/2011/05/maior-escavadeira-do-mundo.html>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

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

KOMATSU. **Komatsu history**. Disponível em: <<https://home.komatsu/en/company/history/>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

MARTINS, Aldrin Gustavo. Simulação das operações de lavra da mina de Brucutu utilizando um modelo de programação linear para alocar os equipamentos de carga. Dissertação. 2013.

MINING PEOPLE INTERNATIONAL. **10 fast facts about Kalgoorlie's massive Super Pit**. Disponível em: <<https://www.miningpeople.com.au/news/10-fast-facts-about-kalgoorlies-massive-super-pit>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

MINING TECHNOLOGY. **Mining vehicles – a ride through time.** Disponível em: <<https://www.mining-technology.com/features/mining-vehicles-ride-time/>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

OEM OFF-HIGHWAY. BERRY, Thomas. **The first hydraulic excavators.** Disponível em: <<https://www.oemoffhighway.com/fluid-power/article/12022256/the-first-hydraulic-excavators>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

ORLEMANN, Eric C. **Power shovels: the world's mightiest mining and construction excavators.** Motorbooks International, 2003.

PORTAL DA MINERAÇÃO. **Curso de Mineração – Básico Módulo II: Geologia de Mina e Operações de Lavra.** Disponível em: <https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2017/07/apo_cbm_modulo_2.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2018.

PORTAL DA MINERAÇÃO. **Vale terá a primeira mina operando somente com caminhões autônomos no Brasil.** Disponível em: <<http://portaldamineracao.com.br/vale-tera-primeira-mina-operando-somente-com-caminhoes-autonomos-no-brasil/>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

RACIA, Ismael Momade. Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração. 2016.

RITCHIEWIKI. **Hydraulic excavator.** Disponível em: <http://www.ritchiewiki.com/wiki/index.php/Main_Page>. Acesso em: 18 nov. 2018.

SUPERPIT. **Fleet list.** Disponível em: <<http://www.superpit.com.au/wp-content/uploads/2015/01/Fleet-list-pp.134-5-LOW-RES.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

SUPERPIT. **History of the Super Pit.** Disponível em: <<http://www.superpit.com.au/about/history/>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

THE WEST AUSTRALIA. JARROD, Lucas. **Bigger is better for equipment evolution.** Disponível em: <<https://thewest.com.au/news/goldfields/bigger-is-better-for-equipment-evolution-ng-ya-357218>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

TUCSON. ASCARZA, Willian. **Mine Tales: Huge haul trucks changed the face of the mining industry**. Disponível em: <https://tucson.com/news/local/mine-ales-huge-haul-trucks-changed-the-face-of-the/article_b7294736-5e4c-5d65-b095-cbe422c834ab.html>. Acesso em: 18 nov. 2018.

TUCSON. ASCARZA, Willian. **Mine Tales: Power shovels made a world of difference**. Disponível em: <https://tucson.com/news/local/minetales/mine-ales-power-shovels-made-a-world-of-difference/article_b311bb89-28e4-5008-9b1e-fe0de41877b1.html#tncms-source=block-contextual-fallback>. Acesso em: 18 nov. 2018.

TUCSON. ASCARZA, Willian. **Mine Tales: Transportation was a big issue in mining industry**. Disponível em: <https://tucson.com/news/local/mine-ales-transportation-was-a-big-issue-in-mining-industry/article_b2b2b4a4-7425-53fe-bb17-4cd94241592d.html>. Acesso em: 18 nov. 2018.

UNO, Keiichiro et al. Development of mining machinery and future outlook for electrification. **Hitachi Review**, v. 62, n. 2, p. 99-106, 2013.

WIKIPEDIA. **Haul truck**. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Haul_truck>. Acesso em: 18 nov. 2018.

WIKIPEDIA. **Steam shovel**. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Steam_shovel>. Acesso em: 18 nov. 2018.

WIKIPEDIA. **Power shovel**. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Power_shovel>. Acesso em: 18 nov. 2018.

8. ANEXOS

- Evolução das escavadeiras ao longo do tempo:

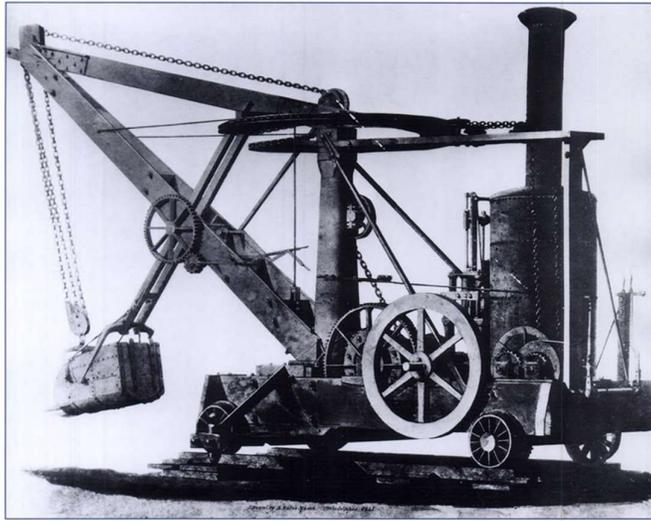


Figura 22: Philadelphia shovel construída em 1841 por William Otis.

Fonte: Orlemann (2003)

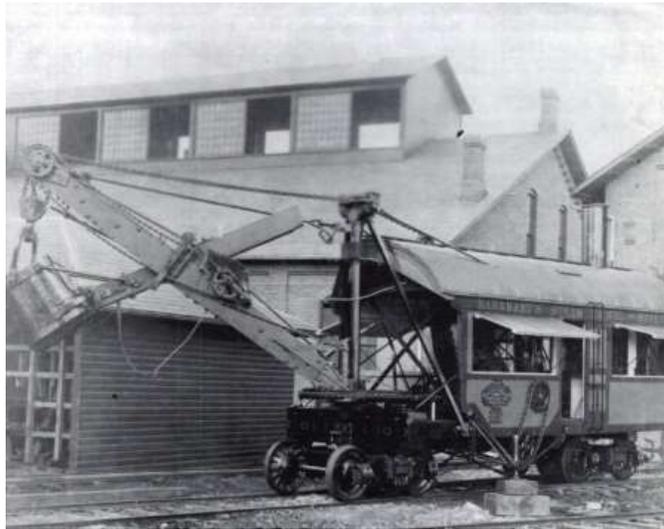


Figure 1: Escavadeira Barnhart Style A, design de 1883.

Fonte: Orlemann (2003)



Figura 23: Escavadeira Bucyrus No. 0, produzida em 1888.

Fonte: Orlemann (2003)

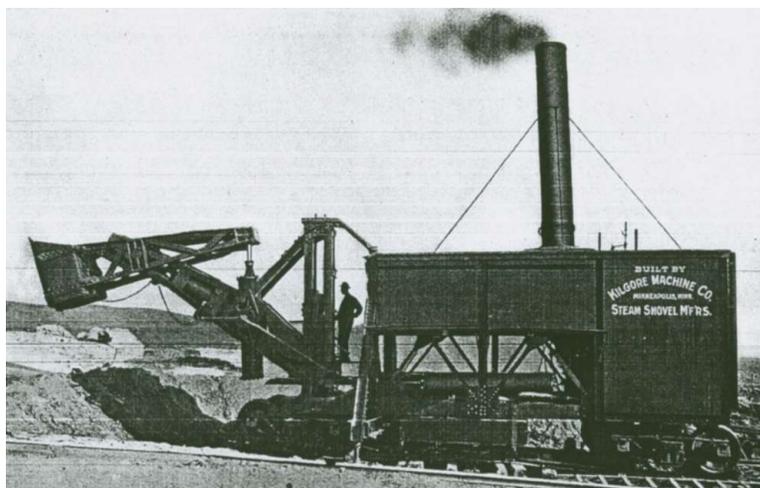


Figura 24: Escavadeira hidráulica sob trilhos Kilgore, operando no final da década de 1890.

Fonte: Berry (2014)

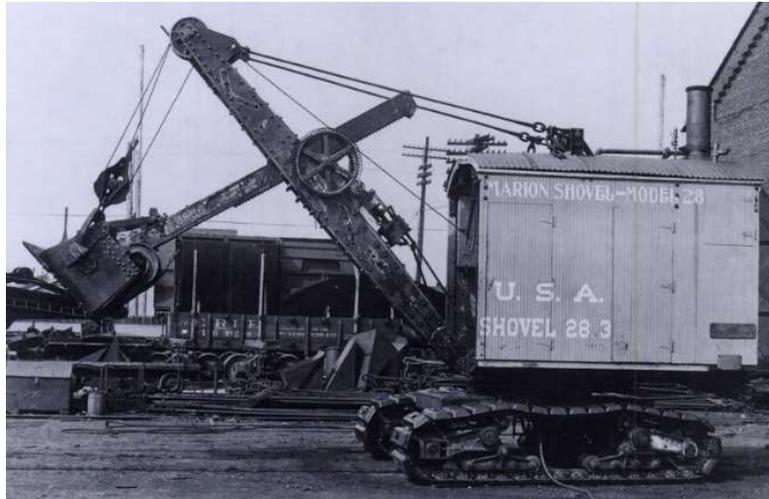


Figura 25: Escavadeira Marion Modelo 28, produzida em 1911.

Fonte: Orlemann (2003)



Figura 26: Escavadeira Marion 300, produzida em 1915.

Fonte: Ascarza (2015)



Figura 27: Escavadeira Bucyrus 50-B, introduzida em 1922.

Fonte: Orlemann (2003)



Figura 28: Escavadeira Bucyrus 100-B, introduzida em 1926.

Fonte: Orlemann (2003)



Figura 29: Escavadeira hidráulica Marion 5480, introduzida em 1928.

Fonte: Orlemann (2003)



Figura 30: Escavadeira elétrica Bucyrus 1050-B, introduzida em 1941.

Fonte: Orlemann (2003)



Figura 31: Escavadeira Marion 5760, introduzida em 1956.

Fonte: Wikipedia (2018)



Figura 32: Escavadeira hidráulica Poclair TY45, produzida em 1960.

Fonte: Richiewiki (2014)



Figura 33: Escavadeira elétrica Marion 6360, introduzida em 1965.

Fonte: Wikipedia (2018)



Figura 34: Escavadeira hidráulica Liebherr R9800.

Fonte: Top10+ (2018)



Figura 35: Escavadeira a cabo CAT 7495.

Fonte: Caterpillar (2018)

- Evolução dos veículos de transporte na mineração:



Figura 36: Carro sob trilho datado do século XV.

Fonte: Mining Technology (2018)

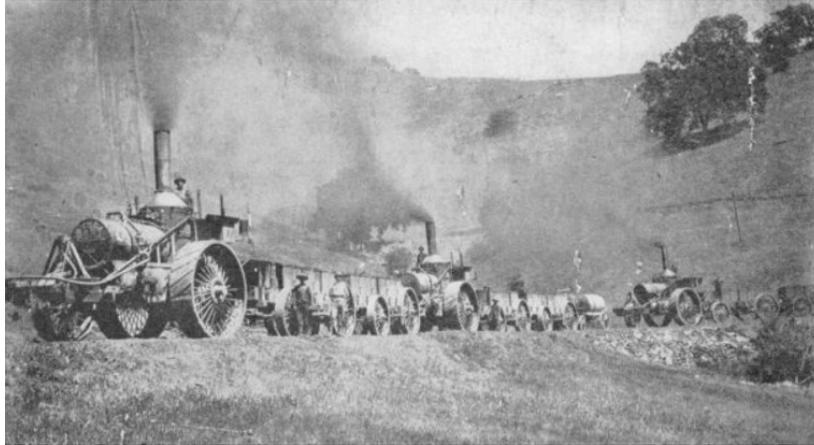


Figura 37: Transporte de minério por trem em 1907. Capacidade de 30 ton por dia.

Fonte: Ascarza (2013)



Figura 38: Transporte de material por mulas em 1907. O transporte era limitado em cerca de 40 km por dia

. Fonte: Ascarza (2013)



Figura 39: Caminhão Moreland sendo carregado na década de 1920.

Fonte: Ascarza (2015)



Figura 40: Caminhão fora de estrada Model 1Z, da Terex criado em 1934.

Fonte: Mining Technology (2018)



Figura 41: Caminhão de 37 toneladas sendo carregado em 1937.

Fonte: Ascarza (2014)



Figura 42: Caminhão Dart 75 TA, de 75 toneladas de capacidade, inaugurado em 1951.

Fonte: Construction Equipment (2010)



Figura 43: Caminhão CAT 789, inaugurado em 1986.

Fonte: Caterpillar (2018)



Figura 44: Caminhão CAT 797, inaugurado em 1998.

Fonte: Caterpillar (2018)



Figura 45: Caminhão Belaz 75710, produzido em 2013 e capacidade de 500 toneladas.

Fonte: Wikipedia (2018)