



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



RAFAEL RIBEIRO DRUMOND E SOUSA MESSIAS

**INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES NA PRODUTIVIDADE DE
CARREGAMENTO EM MINAS A CÉU ABERTO**

OURO PRETO

2022

RAFAEL RIBEIRO DRUMOND E SOUSA MESSIAS

INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES NA PRODUTIVIDADE DE
CARREGAMENTO EM MINAS A CÉU ABERTO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador:

OURO PRETO

2022



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rafael Ribeiro Drumond e Sousa Messias

Influência do número de passes na produtividade de
carregamento em minas a céu aberto

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 26 de Janeiro de 2023

Membros da banca

Dr -Felipe Ribeiro Souza- Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Hernani Mota de Lima- Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Rita de Cássia Pedrosa Santos - Universidade Federal de Ouro Preto

Felipe Ribeiro SOUza, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/02/2023



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Ribeiro Souza, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 13:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0469577** e o código CRC **4CF2F84D**.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre o tamanho dos equipamentos, largura da bancada e leira de segurança.....	13
Figura 2 - Equipamento escavador deslocador	16
Figura 3 - Escavadeira CAT 6060 Front Shovel	17
Figura 4 - Escavadeira Back hoe sobre bancada.....	18
Figura 5 - Escavadeira a cabo CAT 7495	19
Figura 6 - Carregadeira CAT 994K e Caminhão CAT 793F	21
Figura 7 - Movimento completo dos ciclos de uma carregadeira	21
Figura 8 - Custos de lavra utilizando caminhões.....	22
Figura 9 - Match de Escavadeira e Caminhões fora de estrada.....	23
Figura 10 - Match de pás carregadeiras e Caminhões fora de estrada.....	24
Figura 11 - Match de Escavadeiras a cabo e Caminhões fora de estrada	25
Figura 12 - Disposição da carga no caminhão	26
Figura 13 - Caçamba desgastada e substituição dos FPS.....	27
Figura 14 - Faixa de posicionamento do caminhão.....	37
Figura 15 - Especificações Escavadeira a cabo CAT 7495.....	38

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1 - Impacto da Fragmentação do Material sobre o Custo/Ton.....	15
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações Pá carregadeira de rodas 994H (modelo desatualizado)	30
Tabela 2 - Especificações Pá carregadeira de rodas 994K (modelo atual).....	31
Tabela 3 - Especificações técnicas Caminhão fora de estrada 793F.....	31
Tabela 4 - Cálculos de produtividade de carregamento – Carregadeiras de rodas...	32
Tabela 5 - Especificações técnicas escavadeira CAT 6020.....	34
Tabela 6 - Especificações técnicas escavadeira CAT 6030.....	34
Tabela 7 - Cálculos de produtividade do carregamento dos equipamentos considerados.....	35
Tabela 8 - Cálculos de produtividade exclusivos do carregamento.....	38
Tabela 9 - Produtividade Carregamento + Transporte	40
Tabela 10 - Produtividade com variação no tempo de retorno	41

RESUMO

Neste trabalho foi discutido a influência do número de passes necessários para a maximização da produtividade de carregamento. Por meio de simulações determinísticas feitas em Excel, diferentes cenários foram criados para avaliar o impacto de certas variáveis na produtividade. A recomendação dos fabricantes sobre boas práticas de operação e de manutenção são discutidas. O impacto dos principais parâmetros que envolvem a atividade de carregamento também foi avaliado. O primeiro passo é a seleção adequada do equipamento de carga compatível com o veículo de transporte. A escolha da caçamba ideal para o equipamento de carga e o fator de enchimento ideal também foram estudados. O primeiro estudo demonstra o ganho de produtividade com o aumento do porte de uma carregadeira de rodas. O segundo estudo avalia a produtividade do carregamento de acordo com a severidade da operação das escavadeiras. O terceiro estudo visa identificar o número ideal de passes de uma escavadeira a cabo, realizando 2 ou 3 passes. Ao realizar dois passes, o tempo de carregamento é reduzido quando comparado a atividade com três passes. Porém, ao realizar três passes, o veículo transportador é preenchido com 100% de sua carga útil. O fator determinante para identificar o melhor cenário é o tempo de retorno dos caminhões, que foi identificado como tempo crítico para determinar a operação de carregamento adequada.

Palavras-chave: Carregadeiras de roda, Escavadeiras, Caminhões, Produtividade, carregamento, Transporte, Otimização.

ABSTRACT

In this work, the influence of the number of passes necessary for the optimization of loading productivity will be discussed. Through deterministic simulations made in Excel, different scenarios were created to evaluate the impact of certain variables on productivity. Manufacturers' recommendations on good operating and maintenance practices will be discussed, assessing the impact of the main parameters involving the charging activity. The first step is the proper selection of loading equipment compatible with the transport vehicle. The choice of the ideal bucket for the loading equipment and the ideal filling factor were also evaluated. The first study demonstrates the productivity gain with the increase in the size of a wheel loader. The second study evaluates loading productivity according to the severity of excavator operation. The third study was carried out to identify the ideal number of passes for a cable excavator, performing 2 or 3 passes. When performing two passes, the loading time is reduced when compared to activity with three passes. However, when performing three passes, the carrier vehicle is filled with 100% of its payload. The determining factor to identify the best scenario is the time to return the trucks, which will be identified as a critical time to determine the proper loading operation.

Keywords: Wheel loaders, Excavators, Trucks, Productivity, loading, Transportation, Optimization.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 Operações mineiras	13
3.2 Perfuração e desmonte	14
3.3 Escavação e Carregamento	15
3.3.1 Escavadeira	17
3.3.2 Escavadeira front shovel	17
3.3.3 Escavadeiras back hoe	18
3.3.4 Escavadeira à cabo	19
3.3.5 Pá carregadeira	20
3.4 Transporte por caminhões	22
4 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO EQUIPAMENTOS	23
4.1 Compatibilidade entre equipamentos	23
4.2 Escolha da caçamba ideal para equipamento de carga	26
4.3 Produtividade dos equipamentos de carga	27
4.4 Disponibilidade e Utilização	28
5 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES NA PRODUTIVIDADE GERAL. PRIMEIRO ESTUDO	30
5.1 Premissas e equipamentos considerados	30
5.2 Resultados do estudo 1	33
6 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES NA PRODUTIVIDADE GERAL – SEGUNDO ESTUDO	34
6.1 Premissas e equipamentos considerados	34
6.2 Resultados do estudo 2	37
7 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES NA PRODUTIVIDADE GERAL – TERCEIRO ESTUDO	38
7.1 Premissas e equipamentos considerados	38

7.2 Resultados do estudo 3	39
8 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

A extração mineral é um dos setores primordiais da economia do país, contribuindo de forma decisiva para o bem-estar e a melhoria da qualidade de vida de presentes e futuras gerações, sendo fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade equânime, desde que seja operada com responsabilidade social, prezando sempre pelos preceitos de desenvolvimento sustentável (LANA, 2015).

A mineração sempre esteve presente nas principais formas de geração de capital e empregos no estado de Minas Gerais, que já dispõe de mais de três séculos de tradição em atividades de mineração, pesquisas e formação de profissionais.

A complexidade da extração mineral envolve conhecimentos técnicos e estratégicos. A lavra engloba todo o conjunto de operações unitárias de aproveitamento da jazida. As atividades de desmonte, carregamento e transporte constituem o processo de lavra, sendo cada atividade chamada de operação unitária de lavra (CURI, 2017).

Visando operações mais eficientes, seguras e produtivas, a indústria extrativa mineral vem sendo transformada, com estudos de planejamento de lavra mais assertivos, boas práticas de operação e manutenção dos equipamentos e utilização de novas tecnologias para garantir a eficiência e segurança das atividades.

O grande porte dos equipamentos utilizados na mineração a céu aberto, utilizam do conceito de economia de escala, proporcionando movimentações expressivas de materiais. De certa forma, a redução dos custos operacionais está ligada ao aumento da capacidade dos equipamentos, o que possibilitou a viabilidade de empreendimentos antes considerados inviáveis em todo o mundo. Sendo assim, a extração de minérios com teores cada vez menores se torna frequente, integrando cada vez mais mineração, tecnologias e sociedade.

Segundo Lopes (2010), os caminhões tentaram acompanhar o porte das escavadeiras, porém o tamanho dos pneus foi um fator limitante. Nas últimas décadas, o avanço da tecnologia na fabricação de pneus possibilitou um incremento no tamanho dos caminhões até atingir as capacidades produtivas atuais. Por outro lado, as escavadeiras e carregadeiras se adaptaram e passaram a ter tamanhos proporcionais aos caminhões que estão carregando.

Os tradicionais métodos utilizados para os dimensionamentos de frota e escolha dos equipamentos, baseiam-se na experiência dos tomadores de decisão ou

nas informações obtidas em manuais técnicos das empresas fornecedoras dos equipamentos.

A compatibilidade entre equipamento de carga e de transporte é denominada “*fleet match*”, que indica os pares de equipamentos com portes e quantidades compatíveis. O número de passes de cada operação pode variar entre 2 passes (não recomendado) até 10 passes (também não recomendado). A escolha equivocada do “*match*” ideal entre os portes dos equipamentos pode ocasionar grandes desperdícios, diminuição da produtividade e, até mesmo elevação dos custos de produção (QUEVEDO, 2009)

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram escolhidos artigos em português e inglês que apresentavam os principais temas e palavras-chave dos diversos assuntos abordados, assim como manuais de operação e especificações dos equipamentos considerados.

De maneira objetiva, neste trabalho pretende-se testar a hipótese de que a evolução no porte da carregadeira de rodas resulta em um aumento significativo na produtividade de carregamento, desde que a frota de caminhões seja ampliada. Uma comparação com diferentes severidades de operação de carregamento também foi desenvolvida. Para isso, é necessário avaliar o equipamento de transporte compatível com a carregadeira, validar o volume ideal da caçamba, mensurar os tempos de ciclo dos equipamentos e determinar o número de passes ideais para a maximização da atividade de carregamento.

Por fim, o terceiro e último estudo deste trabalho irá avaliar a diferença de produtividade de um carregamento, realizado por uma escavadeira a cabo, realizando 2 ou 3 passes. O critério decisivo para a escolha do número de passes ideais é o tempo de retorno dos caminhões, que, a depender da distância média de transporte, se torna preferível adotar o transporte 100% cheio, sendo necessário o terceiro e último passe para que sua carga seja completa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar a influência do número de passes na produtividade de carga e transporte de minério/estéril em uma mina a céu aberto. Utilizando de simulação de eventos discretos e análises determinísticas. Elaborar cenários para identificar as principais variáveis que impactam no número de passes ideais para realizar o carregamento.

Foram considerados os seguintes grupos de equipamentos: pá carregadeira de grande porte, escavadeiras hidráulicas, escavadeira a cabo e caminhões fora de estrada.

2.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo principal deste estudo, devem ser atendidos os seguintes objetivos específicos:

- Escolha dos equipamentos de mesmo porte;
- Escolha da caçamba adequada (para máquinas de carga e caminhões);
- Fator de enchimento ideal para máxima produtividade de carregamento;
- Qualidade de fragmentação do material;
- Cálculo de volume e peso por passe;
- Identificação de boas práticas para melhor eficiência operacional;
- Medições de tempos de ciclos;
- Avaliar o impacto da severidade da operação de carregamento;
- Determinação do número de passes ideal para máxima produtividade;
- Cálculos de produtividade anuais para carregamento e transporte.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Operações mineiras

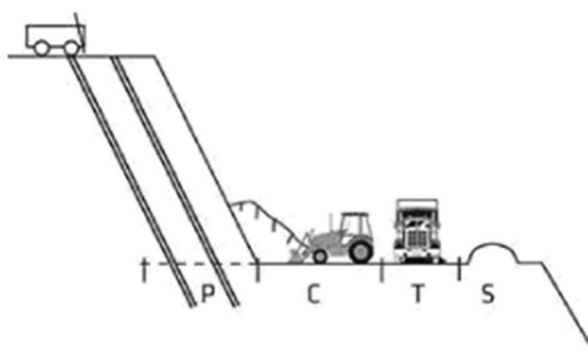
A lavra representa o conjunto de operações unitárias de aproveitamento da jazida, podendo ser realizadas concomitantemente ou não (CURI, 2017)

Segundo Trueman (2001) são quatro as atividades que antecedem a chegada do minério na usina de beneficiamento, denominadas de operações mineiras ou operações unitárias de lavra. São elas: perfuração, desmonte, carregamento e transporte de minério/estéril.

A lavra por bancadas ("Open Pit Mining"), é o método mais utilizado em minas de ferro. Este método possui alguns elementos determinísticos na geometria final da cava e no porte dos equipamentos que ali operam. Conforme a NR-22, qualquer acesso que possua trânsito de equipamentos, deve estar protegido com leiras de segurança, com altura de pelo menos o raio do pneu do maior equipamento que trafegue por ele, bem como duas vezes a largura também da máquina de maior dimensão.

A Figura 1 demonstra esquematicamente a relação ótima e segura dos elementos que compõem uma bancada de trabalho, onde P é o comprimento do furo na bancada, C é a zona de utilização dos equipamentos, T é a largura do veículo transportador e S é a zona de segurança ou leira.

Figura 1 - Relação entre o tamanho dos equipamentos, largura da bancada e leira de segurança



Fonte: Curi (2014)

A seguir, serão apresentadas e discutidas todas as atividades unitárias presentes na lavra, assim como suas influências na produtividade de carregamento e transporte.

3.2 Perfuração e desmonte

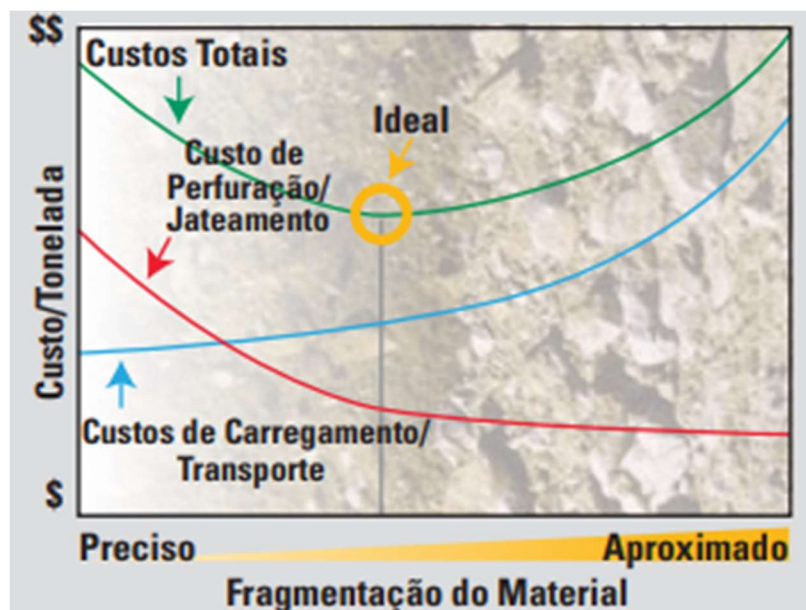
Segundo Silva (2011), perfuração é a primeira operação que se realiza em uma lavra, e tem como finalidade abrir furos com uma distribuição e geometria adequada dentro dos maciços para alojar as cargas de explosivos e acessórios iniciadores.

Ainda segundo o autor, existem três tipos principais de perfuração com a finalidade do desmonte: Perfuração rotativa com brocas tricônicas (Holler Bit); Martelo de superfície (Top-Hammer, método roto-percussivo); Martelo de fundo de furo ou furo abaixo (Down the Hole, método roto-percussivo), sendo divididos em perfurações rotativas e rotopercussivas.

Os custos de perfuração e detonação são altos para se obter uma pilha de material pulverizado. Por outro lado, os custos de carga e transporte são altos para pilhas de material com fragmentação insatisfatória. Portanto, a curva de custo total (soma das curvas de perfuração e detonação e de carga e transporte) tem forma de U.

O Gráfico 1 apresentado a seguir elucida a relação entre a qualidade de fragmentação do material com o custo relativo às atividades de perfuração, desmonte, carregamento e transporte.

Gráfico 1 - Impacto da Fragmentação do Material sobre o Custo/Ton



Fonte: Caterpillar (2020)

Encontrar o custo mínimo, ou ideal, exige a determinação da combinação correta entre perfuração/detonação eficientes para que o carregamento e transporte também sejam eficientes. Posteriormente, será avaliado a influência da qualidade de fragmentação do material na produtividade de carregamento e transporte.

3.3 Escavação e Carregamento

Segundo Hartman e Mutmanský (2002), a escavação implica em uma ação de extrair material sólido, enquanto o carregamento consiste na elevação de material sem extração do mesmo e posterior basculamento em algum veículo de transporte.

Segundo Pinto e Dutra (2008), os equipamentos móveis usados nas operações de escavação e carregamento, simultâneos ou não, são escavadeiras a cabo, escavadeiras hidráulicas, retroescavadeiras hidráulicas, escavadeiras front shovel (ou de caçamba frontal), carregadeiras sobre pneus ou esteira, motoscrapers, dragas e monitores hidráulicos.

De acordo com Jaworski (1997) Os equipamentos escavadores deslocadores são aqueles que utilizam de uma lâmina para deslocar/desagregar o material a ser escavado. Uma das formas de promover a desagregação do corpo mineralizado é a atividade de escarificação, realizada pelos equipamentos com a utilização de escarificadores (ríppers), podendo ser utilizado no decapeamento de estéril na lavra em tiras. Também são utilizados em obras de infraestrutura, como preparação de

acessos e controle de pilhas de materiais. O equipamento escavador deslocador mais comum é o trator de esteiras, apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Equipamento escavador deslocador



Fonte: Caterpillar (2020)

Em aplicações de rocha dinamitada (rocha britada), a escavadeira normalmente conta com o suporte de um trator de esteiras (bulldôzer) para preparar o leito de carregamento. Em alguns casos, a escavadeira preparará seu próprio leito, não estando disponível para carregar caminhões enquanto prepara o leito e realiza a limpeza da frente de lavra/praça de carregamento. O custo desse equipamento de suporte ou do tempo de preparação do leito deve ser levado em conta ao comparar uma escavadeira com uma pá-carregadeira de rodas.

A operação de carregamento em uma mina a céu aberto é realizada posteriormente às atividades de perfuração e desmonte, seja mecânico ou com uso de explosivos. Conforme citado anteriormente, estas atividades unitárias iniciais precisam ser bem executadas para que a fragmentação do material seja ideal, contribuindo para o fator de enchimento ideal das caçambas e prolongando a vida útil das ferramentas que compõem as caçambas dos equipamentos.

Segundo Bastos (2013) e Quiquia (2015), o carregamento é uma operação unitária de um empreendimento mineiro, realizada em circuito fechado com a operação de transporte, feito usualmente por caminhões. De acordo com Silva, 2011), as seguintes etapas correspondem ao tempo de ciclo de carregamento:

- enchimento da concha da unidade de carregamento;
- giro cheio até o local de descarregamento;

- descarregamento do material sobre a unidade transportadora;
- giro vazio até o local de carregamento

3.3.1 Escavadeira

Ainda segundo Jaworski (1997), as escavadeiras representam o principal equipamento escavador elevador, capaz de executar a escavação e carregar a unidade de carregamento posicionada ao lado.

Com o avanço da tecnologia, surgiram variações de tipos de escavadeiras e de dimensões, como as escavadeiras elétricas a cabo, diesel-elétricas e hidráulicas. Os subtópicos a seguir apresentam as principais configurações de escavadeiras utilizadas em empreendimentos no Brasil e no mundo, bem como suas principais características.

3.3.2 Escavadeira front shovel

Borges (2013) aponta que para operações de escavação direta em corpos friáveis na frente de lavra, o uso de escavadeiras tipo shovel (FIG. 3) é mais frequente. Estes equipamentos de carga são adequados para a aplicação em taludes, encostas e pilhas de materiais por terem um elevado alcance máximo para o corte e altas forças de escavação, que propiciam o fator de enchimento da caçamba em menor tempo. Por consequência, apresentam boas taxas de produtividade e ampla aplicação em minas no Brasil e no mundo.

Figura 3 - Escavadeira CAT 6060 Front Shovel



Fonte: Caterpillar (2020)

De acordo com HUSTRULID (2013), uma escavadeira tipo shovel deve dar entre 3 e 5 passes para preencher a báscula de um caminhão, para que a produtividade seja maximizada. Geralmente realiza o carregamento com o caminhão situado no mesmo nível do equipamento.

3.3.3 Escavadeiras back hoe

As escavadeiras do tipo backhoe, ou retroescavadeiras, operam preferencialmente em bancadas acima do nível do caminhão, desmontando a bancada em que está situada e, posteriormente, carregando o caminhão conforme a Figura 4.

Figura 4 - Escavadeira Back hoe sobre bancada



Fonte: Caterpillar (2020)

Segundo o manual de operao do fabricante, a altura da bancada ideal em que a escavadeira trabalha, influencia a produtividade numa ordem de grandeza de 10% a 15%, quando comparada a bancada subdimensionada ou superdimensionada.

O raio de giro do equipamento é determinante no tempo de ciclo de carregamento, onde a diferença de posicionamento do caminhão de 60° e 90° resulta em 5% de perda de produtividade (manual do fabricante). A diferença de produtividade conforme a severidade da aplicao também foi avaliada no segundo estudo deste trabalho.

3.3.4 Escavadeira à cabo

As escavadeiras a cabo representam o maior grupo de equipamentos elevadores, e estão presentes em operações no mundo todo (Figura . 5). O conceito de economia de escala define a alta produtividade destes equipamentos, capazes de carregar cargas elevadas de maneira eficiente.

Diferentemente das máquinas movidas a diesel, as escavadeiras a cabo podem ser totalmente elétricas, por isso apresentam menores custos de operação e menos tempo exigido para manutenção. Em contrapartida, as escavadeiras a cabo necessitam de cuidados redobrados, tanto na movimentação quanto para remanejar o cabo de energia que a alimenta.

O alto custo de aquisição, importação e de investimento em infraestrutura, quase sempre inviabiliza a operação dessas máquinas no Brasil. Apesar dos altos valores de CAPEX, o custo mais baixo de energia elétrica em relação ao diesel e os maiores intervalos entre manutenções, normalmente compensam os investimentos em equipamentos elétricos.

Figura 5 - Escavadeira a cabo CAT 7495



Fonte: Caterpillar (2020)

De acordo com Coutinho (2017), as escavadeiras montadas sobre esteiras se deslocam a uma velocidade aproximada de 1,5 km/h. Devido à baixa mobilidade do equipamento, sua atuação se torna limitada em frentes de lavra de maneira fixa. Por ser um equipamento sob esteiras, o deslocamento de uma escavadeira pode

ocasionar em desgaste mecânico de certos componentes e até mesmo a fadiga do operador.

O ciclo destes equipamentos de escavação e elevação é definido pelos seguintes movimentos elementares:

- Escavação no material e carregamento da caçamba
- Giro carregado
- Descarga no elemento de transporte
- Giro vazio de retorno

Alguns conceitos importantes acerca dos equipamentos de carga precisam ser mencionados. São eles: A carga de tombamento (*tipping-load*) e o *payload*. A carga de tombamento é a carga que faz com que uma escavadeira hidráulica perca o equilíbrio e tombe. A carga útil (*payload*): é a carga que não ultrapassa 80% do “*tipping-load*” (fator de segurança de $100/80 = 25\%$).

3.3.5 Pá carregadeira

Segundo Coutinho (2017), uma carregadeira (FIG. 6) é capaz de se deslocar com uma velocidade de até 45 km/h. Conforme Bohnet (2011), são equipamentos ideais para situações que requerem mudanças de frente de lavra constantemente.

Ao longo do tempo, as pás-carregadeiras de rodas grandes aumentaram de tamanho a fim de atender à crescente capacidade de carga útil dos caminhões fora-de-estrada. Por conseguir trabalhar com altos fatores de enchimento da caçamba, apresentam boa produtividade e são usadas de forma eficaz como ferramentas de carregamento principais nos casos em que a mobilidade está em primeiro lugar. Em condições comuns para aplicações de material bem detonado, as pás-carregadeiras de rodas carregam caminhões ou transportam o material para longe da área de carregamento (*Load and Carry*), mantêm os pisos da praça de carregamento limpos e trabalham entre várias faces de materiais.

Figura 6 - Carregadeira CAT 994K e Caminhão CAT 793F

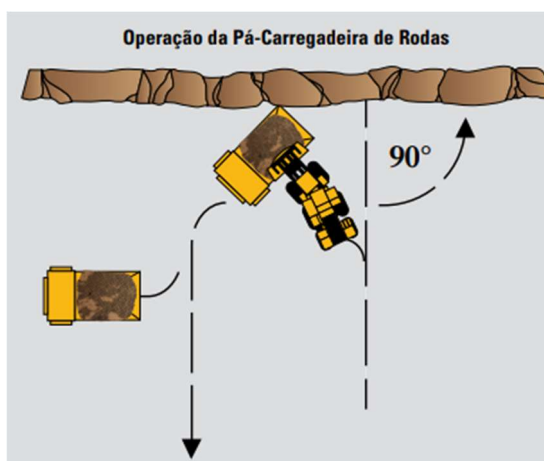


Fonte: Caterpillar (2020)

Assim como mencionado sobre as escavadeiras, as pás carregadeiras de rodas possuem conceitos sobre a carga de segurança aplicável. A carga de tombamento é a carga que faz com que uma carregadeira de rodas perca o equilíbrio e tombe, enquanto a carga útil (*payload*): é a carga que não ultrapassa 50% do “*tipping-load*” (fator de segurança de $50/100 = 50\%$).

A Figura 7 apresenta o movimento completo dos ciclos de uma carregadeira, bem como o posicionamento correto da carregadeira e do caminhão para que a produtividade seja a mais efetiva possível.

Figura 7 - Movimento completo dos ciclos de uma carregadeira



Fonte: Caterpillar (2020)

Sendo assim, o tempo de ciclo das carregadeiras é definido pelos seguintes movimentos elementares:

- avanço perpendicular até a frente de escavação,
- escavação e carga da caçamba,
- manobra e avanço até o veículo de transporte,
- descarga, retorno vazio e manobra;

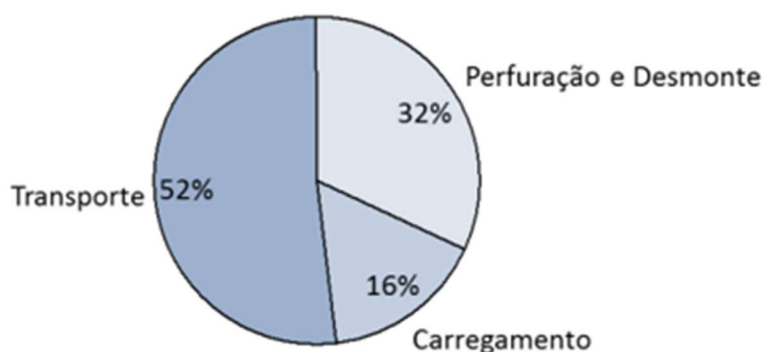
3.4 Transporte por caminhões

O transporte normalmente representa o elemento mais importante em termos de custos logísticos para inúmeras empresas. A movimentação de cargas absorve de um a dois terços dos custos logísticos totais (BALLOU, 2006). Desta maneira, um bom planejamento para o transporte de cargas, é de grande importância para o desempenho do sistema logístico (BARTH; MICHEL, 2012).

Nas operações de lavra a céu aberto, o transporte por caminhões é a operação de maior impacto nos custos operacionais de produção, constituindo algo em torno de 50 a 60% do total. Em ordem de reduzir esse custo, é necessário alocar e despachar os caminhões eficientemente. (ERCELEBI; BASCETIN, 2009).

A Figura 8 a seguir elucida a distribuição geral dos custos de operações de lavra por caminhões.

Figura 8 - Custos de lavra utilizando caminhões.



Fonte: Adaptado de Trueman (2001); Lopes (2010)

Para o equipamento de transporte, o tempo de ciclo irá variar conforme a variação da DMT (Distância Média de Transporte) na mina. O tempo de ciclo para transporte por caminhões abrange as seguintes etapas:

- Carga da unidade
- transporte carregado
- manobra + descarga
- retorno vazio
- posicionamento para carga (manobra)

4 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO EQUIPAMENTOS

4.1 Compatibilidade entre equipamentos

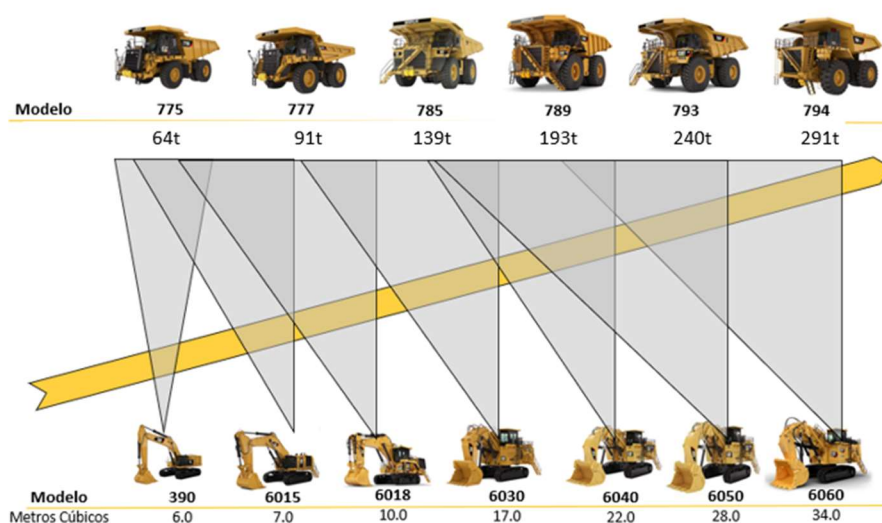
O número de vezes que a máquina de carga descarrega o material escavado na báscula do caminhão representa um passe. O número de passes pode ser obtido pela razão da capacidade da báscula do caminhão dividida pela capacidade da caçamba do equipamento de carga.

A relação ótima do número de passes não deve ser menor do que 3 (três) e nem maior do que 6 (seis). Quando o número de ciclos estiver fora deste intervalo, o dimensionamento dos equipamentos de carregamento ou transporte deve ser revisto. (COUTINHO, 2017, p.19).

Segundo os fabricantes dos equipamentos, o número de passes para enchimento da entidade transportadora não deve ser menor ou igual a dois, visto que os impactos sobre a suspensão e a estrutura do veículo seriam abusivos, sendo prejudicial à integridade do caminhão e do operador.

A Figura 9, retirada de um material elaborado pela Caterpillar (2020) apresenta o match ideal entre escavadeiras hidráulicas e caminhões de mineração de portes semelhantes.

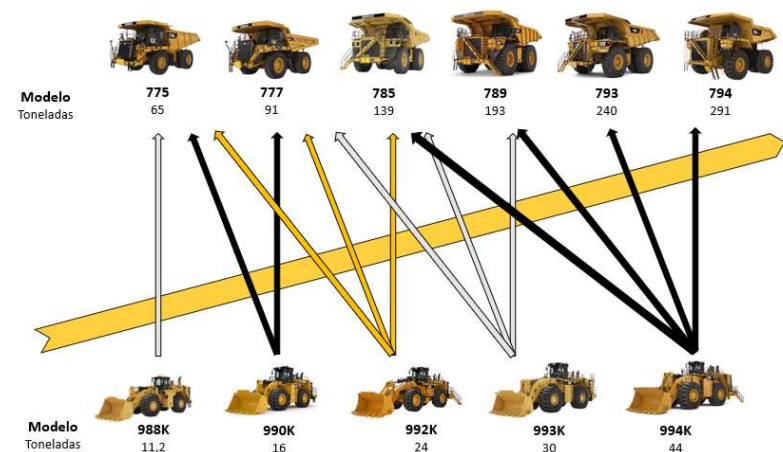
Figura 9 - Match de Escavadeira e Caminhões fora de estrada



Fonte: Caterpillar (2020)

As escavadeiras hidráulicas mais utilizadas na mineração possuem inúmeras configurações e com diferentes portes, com caçambas variando entre 6 metros cúbicos e até 50 metros cúbicos. A Figura 10 elaborada pela Caterpillar (2020), apresenta o match ideal entre carregadeiras de roda e caminhões de mineração.

Figura 10 - Match de pás carregadeiras e Caminhões fora de estrada

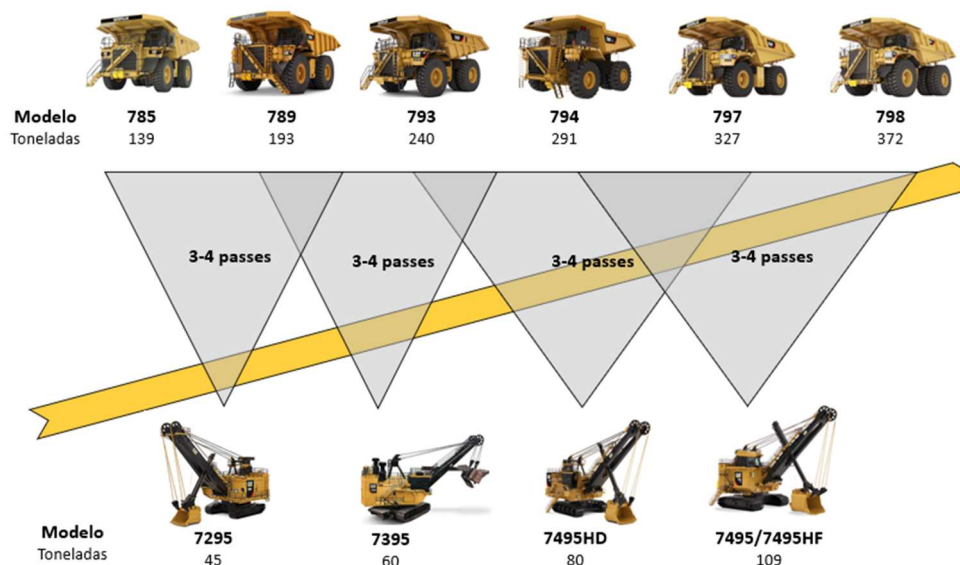


Fonte: Caterpillar (2020)

As carregadeiras de rodas mais utilizadas na mineração possuem inúmeras configurações de arranjos e com diferentes portes, variando entre 11,2 toneladas e até 44 toneladas por passe.

A Figura 11 retirada de um material elaborado pela Caterpillar (2020) apresenta o match ideal entre escavadeiras a cabo e caminhões de mineração de portes semelhantes.

Figura 11 - Match de Escavadeiras a cabo e Caminhões fora de estrada



Fonte: Caterpillar (2020)

Já os caminhões fora de estrada da fabricante Caterpillar são capazes de transportar entre 64 toneladas até 400 toneladas.

Para a escolha certa entre equipamento de carga e transporte, o comprimento do braço da máquina de carga deve ser longo o suficiente para alcançar o centro da caçamba do veículo de transporte, para que assim o material seja depositado de forma centralizada na balsa do caminhão. A centralização da carga é imprescindível, uma vez que cargas deslocadas provocam esforços capazes de torcer o chassi do veículo e provocam desgaste desigual nas suspensões.

A utilização de boas práticas de operação permite estender a vida útil dos componentes e facilitar manutenções preventivas, diminuindo o tempo em que o equipamento se encontra indisponível. A Figura 12 apresenta a forma correta do posicionamento da carga na balsa do caminhão.

Figura 12 - Disposição da carga no caminhão



Fonte: Caterpillar (2020)

4.2 Escolha da caçamba ideal para equipamento de carga

Ao analisar equipamentos de portes semelhantes, é necessário identificar o volume ideal da caçamba a ser utilizada pela máquina de carga e o número de passes necessários para completar o veículo transportador. Cada material possui suas características granulométricas, abrasividade e densidade, sendo que a densidade é fator determinante para o volume ideal da caçamba. A escolha da caçamba com volume ideal para o equipamento de carga deve ser feita sempre respeitando a carga nominal do equipamento de carga e jamais alcançando a carga de tombamento.

Os equipamentos de carga necessitam de uma configuração adequada para cada aplicação, seja do tamanho da lança (alcance da máquina) ou volume da caçamba. A combinação da caçamba certa com a máquina certa fornecerá o melhor desempenho possível em uma aplicação de carregamento em particular.

A escolha da caçamba correta pode reduzir os tempos do ciclo e de carregamento, reduzir os custos de operação e reduzir o esforço e a fadiga desnecessários da máquina, da caçamba e do operador.

A Figura 13 mostra uma configuração de caçamba para uma escavadeira hidráulica, utilizada para rochas duras e abrasivas. É possível notar a presença de Ferramentas de penetração no solo (FPS) bem robustas, que aumentam a penetrabilidade no material. O acréscimo de FPS robustas e placas abrasivas nas

laterais da caçamba aumentam significativamente o peso da caçamba, diminuindo a carga útil a ser levantada pelo equipamento.

Figura 13 - Caçamba desgastada e substituição dos FPS



Fonte: Caterpillar (2020)

A substituição das ferramentas de penetração ao solo se torna indispensável à medida que os componentes utilizados chegam ao final de sua vida útil. Esta substituição garante a penetrabilidade no material e permite que o fator de enchimento da caçamba seja maximizado em um menor tempo.

Segundo Borges (2013), o volume da caçamba é uma função da geometria da caçamba, que consiste no espaço vazio contido em seu interior. O volume da caçamba (V_c) Deve representar a capacidade operacional, rasa ou coroadada conforme o caso, dos equipamentos de carregamento e transporte.

O cálculo do volume ideal da caçamba é obtido pela equação 1:

$$VC = \frac{\text{Payload máquina}}{\text{Densidade material}} \quad (1)$$

4.3 Produtividade dos equipamentos de carga

Tendo em mãos os tempos de ciclo de carregamento, o volume da caçamba e a densidade do material, é possível calcular a produtividade da atividade de carregamento, que apresenta como unidade de medida toneladas/hora.

A produtividade horária ($Phor$) dos equipamentos de carregamento pode ser calculada pela Equação 2:

$$Phor = \frac{VC * FE}{TC} \quad (2)$$

Onde:

VC = Volume da caçamba; FE = Fator de enchimento, definido pela porcentagem do volume da caçamba que é de fato, preenchida com material; TC = tempo de ciclo, em horas.

4.4 Disponibilidade e Utilização

A disponibilidade física é um parâmetro que indica quantas horas disponíveis existem para utilizar o equipamento, e sua determinação é primordial para os cálculos de rendimento anuais. Segundo Moreira (2018), a disponibilidade física dos equipamentos corresponde à parcela das horas programadas em que o equipamento está apto para operar, isto é, não está em manutenção. Segundo o autor, diversos fatores podem ser cruciais e capazes de reduzir a disponibilidade de um equipamento. São eles: Manutenção corretiva, manutenção preventiva, operação em vários turnos, má organização da mina e esperas. O cálculo de disponibilidade física é apresentado pela equação 3:

$$DF = \frac{Hp - Hm}{Hp} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

DF = disponibilidade física que representa a porcentagem do tempo que o equipamento fica à disposição do órgão operacional para a produção;

Hp = corresponde às horas calculadas de produção por ano, na base dos turnos previstos, já levando em conta a disponibilidade mecânica e/ou elétrica;

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

Moreira (2018) ainda demonstra que o fator de utilização é aplicado sobre as horas disponíveis do equipamento, resultando no tempo em que o equipamento está efetivamente operando. A equação 4 elucida o cálculo de utilização:

$$.U = \frac{Ht}{Hp - Hm} \times 100\% \quad (4)$$

Segundo Silva (2011), o rendimento ou fator de eficiência (E) é a relação inversamente proporcional da soma dos tempos de parada (Tp), conforme a equação 5:

$$E = \frac{1}{1 + \frac{\sum Tp}{TCmin}} \quad (5)$$

Onde: TCmin = tempo de ciclo mínimo; Tp = tempos de parada.

Ainda segundo o autor, certos fatores influenciam o desempenho máximo dos equipamentos, listados a seguir:

- Características do material;
- Supervisão no trabalho e fluxos de visitas;
- Falta de caminhão;
- Maior/menor habilidade do operador;
- Interrupções para a limpeza da frente de lavra ou praça de carregamento;
- Queda de blocos nas vias;
- Fator de enchimento da caçamba;
- Pequenas interrupções devido aos defeitos mecânicos e erros humanos, não computados na manutenção.

5 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES NA PRODUTIVIDADE GERAL. PRIMEIRO ESTUDO

5.1 Premissas e equipamentos considerados

O estudo desenvolvido leva em consideração fatores determinísticos de produtividade de carregadeiras de roda, visando determinar o impacto do aumento do porte do equipamento na produtividade.

O material considerado para o carregamento possui uma densidade de 1,8 g/cm³ e apresenta uma excelente qualidade de fragmentação, possibilitando a maximização do fator de enchimento da caçamba.

Para contextualização, o modelo 994H trata-se de uma carregadeira relativamente antiga, enquanto a 994K se apresenta como a atualização do modelo 994, com aumento significativo da carga útil nominal.

As tabelas a seguir apresentam as especificações técnicas de cada equipamento em estudo.

Tabela 1 - Especificações Pá carregadeira de rodas 994H (modelo desatualizado)

Motor			Especificação de Operação		
Modelo de Motor	Cat 3516B HD EUI		Carga Nominal – Levantamento Padrão	35 t	38 ton
Potência Bruta – SAE J1995	1.176 kW	1.577 HP	Carga nominal – levantamento Alto	32 t	35 ton
Potência Líquida – ISSO 9249	1.092 kW	1.463 HP	Carga nominal – Levantamento Alto estendido	32 t	35 ton
			Carga nominal – Levantamento Super alto	32 t	35 ton
Caçamba			Peso Operacional	195.434 Kg	430. 858 lb
Capacidades da caçamba	14-36 m ²	18,5-47 yd ³			

Fonte: Specalog 994H (2006)

O modelo 994H avaliado neste estudo apresenta uma caçamba com volume de 18m³. Já o modelo 994K possui uma caçamba de 26m³, escolhida excepcionalmente devido à qualidade de fragmentação e densidade do material em questão (Tabela 1 e 2).

Tabela 2 - Especificações Pá carregadeira de rodas 994K (modelo atual)

Motor			Caçambas		
Modelo do motor	Cat 3516E		Capacidades da caçamba	19,1-24,5 m ³	25-32 yd ³
Emissões	ao Tier 1 do EPA dos EUA/Estágio I da UE		Especificação de Operação		
Potência bruta – ISO 14396	1.377 kW	1.847 HP	Carga útil nominal - padrão	46,8 t	50 ton.
Potência Líquida – SAE J1349 (Ambiente Padrão)	1.297 kW	1.739 HP	Carga útil nominal – levantamento alto	44,1 t	48 ton.
Potência Líquida – SAE J1349 (Alta temperatura ambiente)	1.265 kW	1.696 HP	Peso operacional	242.605 kg	534.852 lb

Fonte: Specalog 994K

Tabela 3 - Especificações técnicas Caminhão fora de estrada 793F

Motor			Especificações de Operação		
Modelo Motor	Cat C175-16		Capacidade de Carga Útil Nominal	228 t	250 ton.
Potência bruta – SAE J1995	1.976 kW	2.650 HP	Peso Bruto da Máquina em Operação	386.007 ou 390.089 kg (851.000 ou 860.000 lb)	
Potência Líquida – SAE J1349	1.848 kW	2.478 HP			

Fonte: Documento de especificação técnica do equipamento

O veículo de transporte considerado é o Caminhão 793F, cuja capacidade é de 228 toneladas. Sendo assim, a 994H, apresentada na segunda coluna da Tabela 4, necessita de 7 passes para o carregamento completo do caminhão, enquanto a 994K, presente na primeira coluna da Tabela 4, realiza o mesmo carregamento com 5 passes.

A Tabela 4 desenvolvida em Excel apresenta os cálculos de produtividade do carregamento.

Tabela 4 - Cálculos de produtividade de carregamento – Carregadeiras de rodas

Modelo	994K	994H	994K	994K	
Volume Caçamba	26,0	18,0	22,8	22,8	m ³
Fator de Enchimento	97%	101%	100%	80%	%
Carga por passe	45,6	32,7	41,0	32,8	t
Volume por passe	25,3	18,2	22,8	18,2	m ³
Número de passes	5	7	6	7	n
Carga Caminhão	228,0	229,1	246,0	229,6	t
Fator de Carga	100%	100%	108%	101%	%
Volume Báscula	126,7	127,3	136,7	127,6	m ³
Tempo de Carregamento	187	257	222	257	s
Caminhões (Ciclos por hora)	19,3	14,0	16,2	14,0	s
Produtividade máxima teórica	4389	3209	3989	3216	t/h
Produtividade teórica	3819	2792	3471	2798	t/h
Horas Ano	8760	8760	8760	8760	h
DF	85%	87%	85%	87%	%
UF	90%	90%	90%	90%	%
Movimentação Ano	25,59	19,15	23,26	19,19	Mt/a

Fonte: O autor (2022)

O desenvolvimento do estudo se inicia com a escolha da caçamba ideal para a carregadeira de rodas. Os cálculos de produtividade foram iniciados correlacionando o número de passes da carregadeira e a capacidade da caçamba. Assim, é possível determinar a quantidade de massa carregada por caminhão.

Os tempos de ciclo da carregadeira permitem identificar o tempo de carregamento de cada caminhão e, conseqüentemente, a quantidade de caminhões carregados por hora. Para o primeiro passe, foram considerados 5 segundos, visto que a carregadeira realiza o enchimento da caçamba durante a manobra de aproximação do caminhão. Os próximos passes contam com 35 segundos de ciclo e 42 segundos para a manobra do equipamento de carga.

A produtividade máxima teórica (tonelada/hora) pode ser obtida pela multiplicação da carga do caminhão pela quantidade de caminhões carregados por hora. Para identificação da produtividade real, a produtividade máxima teórica foi

ajustada pela eficiência de trabalho, considerada 87% e pelos parâmetros de utilização física e disponibilidade. Extrapolando o cálculo de produtividade horária para períodos anuais, obtemos a movimentação anual total.

5.2 Resultados do estudo 1

Com o aumento significativo do porte da carregadeira, o número de passes necessários para completar o caminhão é reduzido. Consequentemente, o tempo de carregamento diminui, o que resulta em um maior número de caminhões carregados por hora.

As duas colunas a direita da tabela 4 foram criadas para avaliar a influência do volume da caçamba escolhida e do fator de enchimento da caçamba da máquina de carga. Para o material considerado, a escolha de uma caçamba subdimensionada de 22,8 m³ não permite o atingimento da carga útil do equipamento, mesmo com fator de enchimento máximo. Para esta configuração de caçamba com volume de 22,8 m³, o número de passes aumenta de 5 para 6, reduzindo a produtividade do carregamento.

A última coluna, a direita da Tabela 4, considerando uma fragmentação inadequada do material, foi considerado um fator de enchimento igual a 80% com a mesma caçamba de 22,8 m³ subdimensionada, que reduz ainda mais a carga útil do equipamento. Devido a caçamba subdimensionada e com fator de enchimento de 80%, serão necessários 7 passes para realizar o carregamento completo do caminhão, diminuindo significativamente a produtividade.

6 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES NA PRODUTIVIDADE GERAL – SEGUNDO ESTUDO

6.1 Premissas e equipamentos considerados

Para o estudo de produtividade de carregamento apresentado a seguir, foram consideradas duas escavadeiras de grande porte, ambas da fabricante Caterpillar: 6020 e 6030, cujas carga nominais estão na faixa de 20t e 30t, respectivamente. As especificações de cada máquina são apresentadas nas Tabela 5 e 6.

Tabela 5 - Especificações técnicas escavadeira CAT 6020

Especificação de Operação			Motor (Final do Tier 4 do EPA [Environmental Protection Agency, Órgão de Proteção Ambiental] dos EUA)		
Peso Operacional	230 t	254 t	Potência Bruta – SAE J1995	771kW	1.033 HP
Carga Útil da Caçamba	22 t	24 t	Potência Líquida – SAE J1349	761 kW	1.019 HP
Caçamba			Motor (Equivalente ao Tier 2 do EPA dos EUA)		
Capacidade da Caçamba Padrão (Coroadada 1:1) 12 m ³		15,7 yd ³	Potência Bruta – SAE J1995	776 kW	1.040 HP
			Potência Líquida – SAE J1349	770 kW	1.032 HP

Fonte: Specalog 6020

Tabela 6 - Especificações técnicas escavadeira CAT 6030

Motor*			Caçamba		
Modelo do Motor	2 x Cat C27 ACERT™		Capacidade da Caçamba – Pá Frontal (coroadada 2:1)	16,5 m ³	21,6 yd ³
Potência Bruta – SAE J1995	1.140 kW	1.530 HP	Capacidade da Caçamba – retroescavadeira (coroadada 1:1)	17 m ³	22,2 yd ³
Potência Líquida – SAE J1349	1.140 kW	1.530 HP	Especificação de Operação		
*Opção de comando elétrico disponível (1.000 kW) na 6030 AC/6030 AC FS			Carga Útil da Caçamba	30 t	34 ton
			Peso Operacional – Pá Frontal	294 t	324 ton.
			Peso Operacional - Retroescavadeira	296 t	326 ton.

Fonte: Specalog 6030

O principal objetivo deste segundo estudo é avaliar o impacto da severidade da operação de carregamento, que leva em conta fatores físicos como o posicionamento correto do caminhão a ser carregado, estrutura da praça de carregamento, tempo necessário para obter o fator de enchimento máximo e características do material, como dificuldade em ser escavado e granulometria inadequada.

A Tabela 7 desenvolvida em Excel apresenta os cálculos de produtividade do carregamento dos equipamentos considerados.

Tabela 7 – Cálculos de produtividade do carregamento dos equipamentos considerados

Modelo	6020	6020	6020	6020	
Fator de enchimento	100%	93%	85%	65%	%
Carga por passe	21,6	20,1	18,4	14,0	t
Volume por passe	12,0	11,2	10,2	7,8	m ³
Número de passes	4	5	5	6	nº
Carga Caminhão	86,4	100,4	91,8	84,2	t
Fator de carga	95%	110%	101%	93%	%
Volume báscula	48,0	55,8	51,0	46,8	m ³
Tempo de Ciclo	24	31	38	45	s
Manobra	42	42	42	42	s
Tempo de carregamento	119	171	199	272	S
Caminhões por hora	30,3	21,1	18,1	13,2	s
Produtividade máxima teórica	2614	2115	1661	1115	t/h
Produtividade teórica	2614	2115	1661	1115	t/h
Horas calendário	8760	8760	8760	8760	h
Movimentação Ano	17,52	14,50	11,13	7,65	Mt/a
Modelo	6030	6030	6030	6030	
Fator de enchimento	100%	95%	80%	65%	%
Carga por passe	30,6	29,1	24,5	19,9	t
Volume por passe	17,0	16,2	13,6	11,1	m ³
Número de passes	3	3	4	5	nº

Carga caminhão	91,8	87,2	97,9	99,5	t
Fator de carga	101%	96%	108%	109%	%
Volume bascula	51,0	48,5	54,4	55,3	m ³
Tempo de Ciclo	24	31	38	45	s
Tempo de Carregamento	95	109	161	227	s
Trucks/Cycles per hour	37,9	33,0	22,4	15,9	nº
Produtividade Máxima Teórica	3479	2880	2190	1577	t/h
Horas Calendário	8760	8760	8760	8760	h
Movimentação Ano	23,31	19,76	14,67	10,82	Mt/a

Fonte: O autor (2022)

A principal diferença entre os cenários analisados é a severidade da aplicação do carregamento. A primeira coluna da Tabela 7 conta com o fator de enchimento inicial igual a 100% e diminuindo gradativamente para as colunas à direita. Os tempos de ciclo também aumentam gradativamente, a depender da distância em que o caminhão está posicionado e da dificuldade em escavar o material e encher a caçamba.

Os cálculos de produtividade foram iniciados correlacionando o número de passes das escavadeiras e as capacidades das caçambas, resultando na massa carregada por cada caminhão. A escavadeira modelo 6020 apresenta uma caçamba de volume igual a 12 m³, enquanto a escavadeira 6030 possui uma caçamba de 17 m³. Ambas carregam o mesmo modelo de caminhão, o CAT 777, de carga útil de 91 toneladas.

Os tempos de ciclo das escavadeiras permitem identificar o tempo de carregamento de cada caminhão e, conseqüentemente, a quantidade de caminhões carregados por hora. O primeiro passe realizado pela escavadeira corresponde a 5 segundos, visto que o enchimento da caçamba é realizado durante a manobra de aproximação do caminhão. Esta manobra em marcha ré contabilizou 42 segundos.

A produtividade máxima teórica (tonelada/hora) pode ser obtida pela multiplicação da carga do caminhão pela quantidade de caminhões carregados por hora. Para identificação da produtividade real, a produtividade máxima teórica foi ajustada pela eficiência de trabalho e pelos parâmetros de utilização física e disponibilidade. Extrapolando o cálculo de produtividade horária para períodos anuais, obtemos a movimentação anual total.

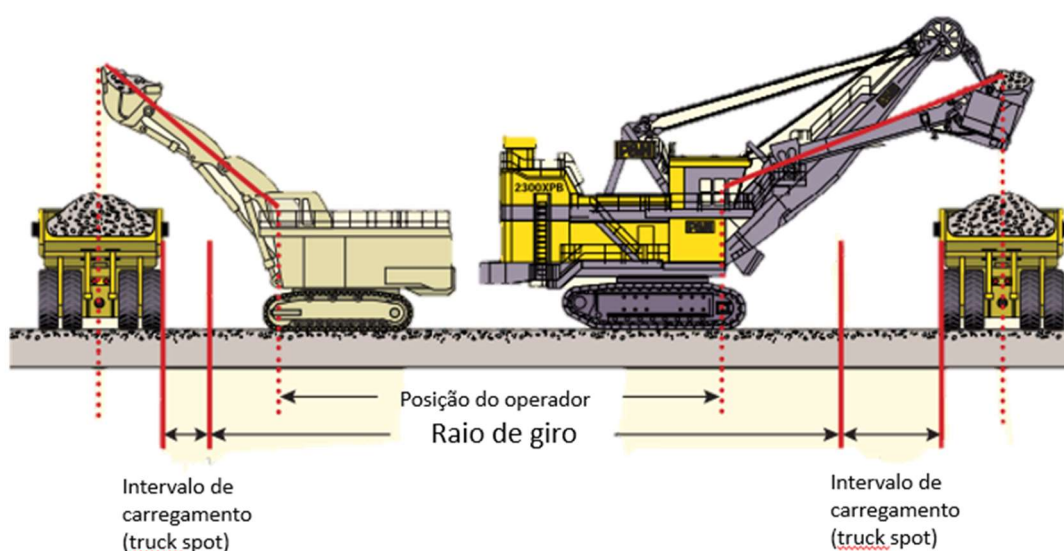
6.2 Resultados do estudo 2

A primeira coluna da Tabela 7 apresenta a melhor condição de operação, com menores tempos de ciclo, maior fator de enchimento da caçamba das escavadeiras e, conseqüentemente, menor número de passes. A última coluna, situada à direita da tabela 7 representa uma condição de operação severa, com baixo fator de enchimento, tempos de ciclo maiores e, conseqüentemente, maior número de passes.

Com o desenvolvimento dos cálculos, fica evidente a influência da severidade da operação na produtividade de carregamento. Este estudo considera apenas a atividade de carregamento e os fatores que a influenciam, não considerando perdas relativas à falta de caminhões.

A Figura 14 aponta a faixa em que o caminhão deve estar posicionado para que o carregamento seja efetivo, respeitando o alcance do equipamento de carga e a visibilidade dos operadores envolvidos. O caminhão corretamente posicionado viabiliza menores tempos de ciclo, diminuindo a severidade da aplicação do carregamento.

Figura 14 – Faixa de posicionamento do caminhão



Fonte: Caterpillar (2020)

7 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PASSES NA PRODUTIVIDADE GERAL – TERCEIRO ESTUDO

7.1 Premissas e equipamentos considerados

Para este estudo, assim como nos estudos já apresentados, será demonstrado a influência do número de passes na produtividade de carregamento. Posteriormente, será avaliado a influência do tempo de retorno dos caminhões para determinar o número de passes ideal para o carregamento.

Os equipamentos considerados foram:

- Caminhão 793F (especificações apresentadas no primeiro estudo)
- Escavadeira a cabo 7495

Algumas informações importantes sobre a escavadeira a cabo 7495 são apresentadas na figura 15 a seguir:

Tabela 8 - especificações Escavadeira a cabo CAT 7495

Dimensões		
Carga Útil da draga	109 t	120 ton.
Capacidade da draga	30,6-62,7 m ³	40-82 yd ³
A depender da aplicação e da densidade do material		

Fonte: Specalog 7495

A Tabela 9 apresenta os cálculos de produtividade exclusivos do carregamento, com diferentes fatores de enchimento e entre 2 ou 3 passes.

Tabela 9 - cálculos de produtividade exclusivos do carregamento

Modelo	7495	7495	7495	
Volume Caçamba	55,8	55,8	63,0	m ³
Densidade material	1,81	1,81	1,81	g/cm ³
Fator de enchimento	75%	105%	100%	%
Carga por passe	76,0	106,0	114,0	t
Volume por passe	42,0	58,6	63,0	m ³
Número de passes	3	2	2	nº
Carga Caminhão	228,0	212,1	228,1	t
Fator de carga	100%	93%	100%	%

Volume bascula	126,0	117,2	126,0	m ³
Primeiro Passe	40	45	40	s
Tempo de Ciclo	35	40	35	s
Tempo de carregamento	110	85	75	s
Caminhões por hora	32,7	42,4	48,0	nº
Produtividade máxima teórica	7462	8983	10947	t/h
Produtividade teórica	6193	7456	9086	t/h
Movimentação Ano	41,5	49,96	60,89	Mt/a

Fonte: O autor (2022)

A primeira coluna da Tabela 9 representa o carregamento realizado com 3 passes, contando com um fator de enchimento médio de cada passe de 75,25%. Com a realização de 3 passes, é possível carregar o caminhão com 100% da carga útil suportada por ele

A coluna central da Tabela 9 indica um fator de enchimento por passe igual a 105% com dois passes, resultando em 93% da carga útil do caminhão.

Os tempos de ciclo de cada operação foram ajustados, visto que para realizar o carregamento com 2 passes, é necessário escavar e completar adequadamente a caçamba, contando com 5 segundos a mais em cada passe.

Os fatores de eficiência de trabalho, disponibilidade física e utilização foram aplicados na produtividade horária, a fim de estipular a produtividade anual.

O índice de eficiência no trabalho aplicado foi de 83% para todos os cenários. A disponibilidade considerada foi de 85%, enquanto a utilização contabilizou 90%. Tais valores utilizados indicam um bom rendimento operacional dos equipamentos, representando uma “operação saudável”.

7.2 Resultados do estudo 3

Comparando os resultados da Tabela 9, é possível perceber que o tempo de carregamento de um caminhão é menor quando 2 passes são considerados, já que

conta com um ciclo efetivo a menos de carregamento, o que resulta em maior produtividade do carregamento. Ao analisar a última linha da Tabela 9, é possível perceber que a diferença da movimentação ao final de um ano fica ainda mais evidente.

Para a última coluna, situada a direita da Tabela 9, uma caçamba de maior volume (63m^3) foi considerada, para que em 2 passes seja possível completar a carga do caminhão em 100%. Este cenário seria disparadamente o mais produtivo, porém existem uma série de limitações que restringem essa operação. A caçamba de maior volume, para a densidade do material considerada, ultrapassaria a carga nominal da escavadeira a cabo, afetando a integridade do equipamento. A realização de 2 passes também é prejudicial à integridade dos caminhões, visto que a escavadeira a cabo realiza o despejo da carga da caçamba de uma vez, afetando seriamente os componentes mecânicos dos caminhões.

Considerando cada cenário de carregamento, a tabela de produtividade de transporte foi desenvolvida. O tipo de operação é de carregamento por dois lados. Sendo assim, o tempo de troca entre os caminhões é nulo.

Tabela 10 - Produtividade Carregamento + Transporte

Densidade 1,81			
	#3 Passes (228t)	#2 Passes (212t)	#2 Passes (228t)
7495 Produtividade (MTPA)	41,50	49,96	60,89
Volume da caçamba (m^3)	55,80	55,80	63,0
Fator de enchimento (%)	75%	105%	102%
Densidade do material (t/m^3)	1,81	1,81	1,81
793D Payload	228	212	228
Primeiro Passe + Giro	40	45	45
Tempo de Ciclo (s)	35	40	40
Tempo de carregamento	1,83	1,42	1,25

793 tempo em trajeto (min)	4	4	4
Ciclos por hora	10,29	11,08	11,43
7495 Eficiência (%)	83%	83%	83%
7495 Produtividade (t/h)	6193,39	7455,79	9085,91
Produtividade caminhão (t/h)	2345,1	2348,3	2605,7
Caminhões Carregados por hora	2,2	2,8	3,2
Eficiência alvo	75%	75%	75%
Horas por ano	6570	6570	6570
793D Total Produção por caminhão	15.407.589	15.428.382	17.119.543
Delta (%)	0,00%	0,13%	11,11%
Delta (tons)	0	20.793	1.711.954

Fonte: O autor (2022)

Analisando a eficiência do transporte, é possível perceber que a distância de transporte, e consequentemente, o tempo de retorno são cruciais para este estudo.

Considerando um tempo de retorno dos caminhões igual a 4 minutos, a diferença de produtividade entre 2 ou 3 passes é praticamente nula. Para distâncias cada vez menores, resultando em tempo de ciclo de transporte menores que 4 minutos, o carregamento com 2 passes se torna o mais produtivo.

Para tempos de ciclo de transporte maiores que 4 minutos, o carregamento com 3 passes se apresenta como mais eficiente e produtivo, uma vez que o elemento transportador transporta 100% de sua carga útil.

Tabela 11 - Produtividade com variação no tempo de retorno

Densidade 1,81			
	#3 Passes (228t)	#3 Passes (212t)	#2 Passes (228t)
7495 Produtividade (MTPA)	41,50	49,96	60,89

Volume da caçamba (m ³)	55,80	55,80	63,0
Fator de enchimento (%)	75%	105%	102%
Densidade do material (t/m ³)	1,81	1,81	1,81
793D Payload	228	212	228
Primeiro Passe + Giro	40	45	45
Tempo de Ciclo (s)	35	40	40
Tempo de carregamento	1,83	1,42	1,25
793 tempo em trajeto (min)	20	20	20
Ciclos por hora	2,75	2,80	2,82
7495 Eficiência (%)	83%	83%	83%
7495 Produtividade (t/h)	6193,39	7455,79	9085,91
Produtividade Caminhão (t/h)	626,6	593,9	643,8
Caminhões Carregados por hora	10,9	14,1	16,0
Eficiência alvo	75%	75%	75%
Horas por ano	6570	6570	6570
793D Total Produção por caminhão	4.116.531	3.902.120	4.229.534
Delta (%)	0,00%	- 5,21%	2,75%
Delta (tons)	0	- 214.411	113.003

Fonte: O autor (2022)

Visando analisar o impacto na produtividade, o tempo de retorno do caminhão foi considerado de 20 minutos. Para tempos de transporte maiores que 4 minutos, é possível perceber que o cenário mais produtivo é aquele que o caminhão transporta 100% da sua carga útil (228t). O impacto na produtividade é apresentado na linha Delta, onde a diferença da produtividade de cada cenário é apresentada em porcentagem.

8 CONCLUSÃO

Com os resultados dos três estudos apresentados, podemos identificar parâmetros que impactam significativamente na produção de carregamento dos caminhões.

Como conclusão principal da análise da Tabela 4, é notável que a atualização de um novo modelo de carregadeira de rodas de maior porte, necessita também de um aumento da frota de caminhões, considerando que a cada hora é possível carregar pouco mais de 5 caminhões. Caso a frota de caminhões permaneça a mesma, a carregadeira de maior porte ficaria mais tempo ociosa, não apresentando ganhos significativos de produtividade.

Também foi possível perceber o impacto da escolha inadequada de uma caçamba para a carregadeira de rodas. A caçamba de 22,8 m³ não permitiu o atingimento da carga útil do equipamento de carga, sendo necessário realizar mais um passe para compensar este subdimensionamento.

Ainda foi possível identificar o impacto da qualidade de fragmentação do material na produtividade do carregamento. Devido à dificuldade de escavação e tamanho excessivo do material, foi considerado um fator de enchimento igual a 80%, que também resulta na necessidade de realizar mais um passe para completar o carregamento.

Com o desenvolvimento do segundo estudo, foi possível mensurar o impacto da severidade da operação na produtividade de carregamento. Na Tabela 7, cenários com operações consideradas ideais foram comparados com cenários mais severos, que constam maiores tempos de ciclo e menor fator de enchimento da caçamba do equipamento de carga.

Fatores como o posicionamento do caminhão, dificuldade em escavar o material e encher a concha são capazes de aumentar os tempos de ciclo e diminuir a produtividade. Nesse estudo, apenas a atividade de carregamento e os fatores que a influenciam foram considerados, não contabilizando perdas relativas à falta de caminhões.

No terceiro e último estudo, foi possível identificar o tempo crítico de retorno, capaz de indicar se a operação de carregamento deve ser realizada com 2 ou 3 passes. Para tempos de retorno iguais ou menores que 4 minutos, o carregamento com dois passes se torna o mais produtivo, porém este não é indicado.

Para tempo de retorno do caminhão superior a 4 minutos, se torna preferível que o veículo de transporte realize o traslado com sua carga completa, necessitando do terceiro e último passe para isto.

REFERÊNCIAS

- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**: trad. Raul Rubenich. Porto Alegre: Bookman, 5. ed, 2006.
- BORGES, T. C. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, 98 f, 2013.
- COUTINHO, H. L. **Melhoria Contínua Aplicada para Carregamento e Transporte na Operação de Mina a Céu Aberto**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.
- CURI, A. **Minas a Céu Aberto**: planejamento de lavra, Oficina de Textos, São Paulo, 2014.
- HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. John Wiley & Sons, 2002.
- HUSTRULID, W. **Open Pit Mine Planning & Design**. Rotterdam: Balkema, 3. ed, v. 1. 295 p., 2013.
- 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.
- LANA, Z. M. O. A atividade mineradora em Minas Gerais e em Ouro Preto: impactos socioambientais e intervenções para a sustentabilidade. **Sociedade e Território**, v. 27, n. 3, p. 45–59, 2015.
- LOPES, J. R. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com uso de sistema de britagem móvel “In Pit” auto propelido**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 90, 2010.
- QUEVEDO, J. M. G.; DIALLO, M.; LUSTOSA, L. J. **Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto**. 2009. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção) - Pontifícia Universidade 97 Católica do Rio de Janeiro, 133 p. 2009.
- PINTO, C.; DUTRA, J. G. **introdução ao planejamento e operação de lavra** (A Céu Aberto e Subterrânea). Universidade Corporativa Chemtech. Belo Horizonte – MG, 2008
- SILVA, V. C. **Carregamento e Transporte de Rochas**. Apostila. DEMIN/UFOP. 2011.

SODRÉ, D. F. **Análise de tempos e movimentos e dimensionamento de frota de uma mina a céu aberto**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 69, 2019.

CATERPILLAR. **Manual de Produção**. 36ª edição, Caterpillar inc. USA, 2004.

SPECALOG 6020. Disponível em:

https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/hydraulic-mining-shovels/hydraulic-mining-shovels/18436200.html. Acesso em: 15 dez. 2022.

SPECALOG 7495. Disponível em:

https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/electric-rope-shovels/electric-rope-shovels/18416406.html. Acesso em: 15 dez. 2022.

SPECALOG 994K. Disponível em:

https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/wheel-loaders/large-wheel-loaders/1000001147.html. Acesso em: 15 dez. 2022.

TRUEMAN, E. **In pit crushing**: the application and benefits of track mounted crushing equipment. Goldfields mining expo. Wertern Austrália. 2001.