

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

Bernardo Abraão Campos Salles

**DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE PARA
TRECHO VIRTUAL DE MINA: UM ESTUDO DE CASO**

Belo Horizonte

2022

Bernardo Abrahão Campos Salles

**DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE CAMINHÕES FORA DE ESTRADA PARA
TRECHO VIRTUAL DE MINA: UM ESTUDO DE CASO**

Monografia

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Minas Gerais como parte obrigatória para obtenção do título de especialista.

Orientadora: PROFA. DRA. Viviane Da Silva Borges Barbosa

Belo Horizonte

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO BERNARDO ABRAHÃO CAMPOS SALLES

Realizou-se, no dia 16 de novembro de 2022, às 09:00 horas, na Plataforma Google Meet, a defesa de monografia intitulada "DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE PARA TRECHO VIRTUAL DE MINA: UM ESTUDO DE CASO",

apresentado por BERNARDO ABRAHÃO CAMPOS SALLES, número de registro 2020719988, graduado no curso de ENGENHARIA MECÂNICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS. Segue a descrição dos membros da Comissão Examinadora: Profa. Viviane da Silva Borges Barbosa (orientadora), Professor Pedro Benedito Casagrande (Universidade Federal de Minas Gerais) e Leonardo Junior Fernandes Campos (Universidade Federal de Minas Gerais).

A Comissão considerou a defesa do artigo:

(X) Aprovada

() Reprovada

Nota: _____

73,00 (setenta e três)

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 16 de novembro de 2022.

Viviane S B Barbosa

Viviane da Silva Borges Barbosa
Professora do Departamento de
Engenharia de Minas/UFMG

Profa. Viviane da Silva Borges Barbosa (Doutora)

Pedro Casagrande

Prof. Pedro Benedito Casagrande (Doutor)

Leonardo Junior Fernandes Campos

Leonardo Junior Fernandes Campos (Doutor)

Risla Magriotis Pappi
Risla Magriotis Pappi
Coordenadora do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Minerais

Aurea Domingos
Aurea Domingos
Secretaria do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Minerais

RESUMO

Entre os diversos processos de uma exploração mineral em mina a céu aberto, temos nas atividades de carregamento e transporte de material um dos principais custos de produção. Visando a constante busca por redução de custos e aumento de produtividade, se exige um dimensionamento de frota ideal às condições de operação observadas na mina. Ou seja, nem sempre equipamentos de maior porte oferecem um menor custo por tonelada movimentada, uma vez que juntamente com maiores produtividades se tem gastos maiores e maior complexidade na operação dos mesmos. O presente trabalho demonstrou, através de um estudo de caso, o dimensionamento ideal da frota de equipamentos de carregamento e transporte para um trecho de exploração virtual da Mina do Sapo. Nesse estudo realizado para uma operação em mina à céu aberto o método de análise levou-se em consideração as informações disponibilizadas por fabricantes de equipamentos, além de artigos científicos e trabalhos acadêmicos. Por fim foi feita uma validação do trecho virtual de mina e uma simulação em planilha eletrônica para obtermos o porte da frota de equipamentos. A partir do que foi exposto no presente trabalho, concluiu-se que há uma relação entre as capacidades de carga e produtividade ao se selecionar os equipamentos de transporte e carregamento. Ou seja, para se atingir uma maior produtividade e um custo de produção ótimo, é necessário que os portes dos equipamentos utilizados na lavra e transporte estejam alinhados.

Palavras-chave: dimensionamento de frota, carregamento e transporte, mineração a céu aberto, produtividade, custos.

ABSTRACT

Among the various processes of a mineral exploration in an open pit mining operation, we have in the activities of loading and hauling one of the main production costs. Aiming at the constant search for cost reduction and productivity increase, it requires an ideal fleet sizing considering the operating conditions observed in the mine. In other words, larger load and haul equipment's does not always offer a lower cost per ton moved, since greater productivity comes also with higher costs and more complexity in their maintenance and operation. The present study demonstrated, through a case study, the ideal fleet sizing of loading and haul machines for a virtual exploration of the Mina do Sapó section. In this study carried out for an open pit mine operation, the analysis method took into account the information provided by equipment manufacturers, in addition to scientific articles and academic studies. Finally, a validation of the virtual section of the mine was carried out and a simulation in an electronic spreadsheet was done to determine the size of the machine's fleet. From what was exposed in the present study, it was concluded that there is a relationship between load capacities and productivity when selecting a load and haul fleet. So, to achieve greater productivity and an optimal production cost, it is necessary that the sizes of the equipment used to load and haul transport are aligned.

Keywords: fleet sizing, load and haul, open pit mining, productivity, costs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de operação em lavra a céu aberto.....	10
Figura 2: Escavadeira hidráulica <i>Front Shovel</i> – Caterpillar 6040.	12
Figura 3: Escavadeira a cabo – Caterpillar 7495.....	13
Figura 4: Carregadeira sob rodas – Caterpillar 994K.....	13
Figura 5: Fluxo de produção em mina a céu aberto.	14
Figura 6: Evolução do porte dos caminhões fora de estrada utilizados na mineração.	15
Figura 7: Quantidade de passes ideais entre modelos de escavadeiras hidráulicas Caterpillar e seus caminhões fora de estrada.....	15
Figura 8: Gráfico da capacidade de carga de alguns caminhões basculantes.....	16
Figura 9: Composição dos custos operacionais de transporte por caminhões na Austrália e nos E.U.A.	17
Figura 10: Detalhes da distribuição de uma frota de carregamento e transporte de pequeno porte (1) e de maior porte (2).....	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distâncias de transporte.....	22
Tabela 2: Detalhes operacionais da frota de transporte selecionada para o estudo.....	23
Tabela 3 Detalhes operacionais da frota de carga selecionada para o estudo.	23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivos geral e específicos	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 Lavra a céu aberto.....	10
2.2 Equipamentos de lavra: mina a céu aberto	11
2.2.1 Equipamentos de carregamento.....	11
2.2.2 Equipamentos de transporte	14
2.2.3 Conceitos básicos para estimativa de produtividade	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 Premissas para o dimensionamento de frota	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
5. CONCLUSÃO.....	24
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda por recursos minerais e o esgotamento das jazidas de fácil extração, teores cada vez mais baixos são explorados. Sendo assim, a constante busca pelo aumento da produtividade e redução de custos promovem um forte aporte de investimentos na indústria de mineração.

Visto que os custos operacionais dos equipamentos de carregamento e transporte correspondem por uma parcela considerável dos custos de uma mineradora, o dimensionamento correto da frota de uma mina é imprescindível para a sustentabilidade econômica do empreendimento. Essa análise deve ser feita de forma a compatibilizar o porte dos equipamentos de escavação, carregamento e transporte em termos de custos operacionais e alinhá-los às expectativas de movimentação e processamento diários de material. Outro fator determinante na seleção de equipamentos é o ciclo de vida da mina em questão, além das restrições técnicas, operacionais e de segurança.

Com a evolução das máquinas usadas para carregamento e transporte na mineração a céu aberto, percebe-se um aumento considerável no porte desses equipamentos. Sendo assim, a disponibilidade de máquinas de transporte de capacidade nominal de até 500 t e de escavadeiras de capacidade nominal de até 170 t, criou-se uma expectativa de que um modal de maior porte resultaria em maior produtividade e, conseqüentemente, menor custo por tonelada movimentada. Entretanto, vários estudos têm mostrado que nem sempre maiores portes resultam em maiores produtividades. Equipamentos maiores demandam melhores condições de manutenção e operação, além de estrutura especializada.

Com todos os requisitos para manutenção e operação de frotas de grande porte, faz-se necessário um planejamento e administração mais assertivos dos capitais de investimento. Caso o planejamento do empreendimento não considere todas as variáveis críticas e caso não esteja preparado para um nível de complexidade operacional, a redução de custo por tonelada movimentada decorrente da escolha do modal de grande porte certamente não será menor que o aumento dos custos de manutenção de grandes máquinas.

1.1 Objetivos geral e específicos

O objetivo geral desse trabalho é determinar a frota de equipamentos de carga e transporte para atender a meta de produção estipulada para um trecho da Mina do Sapo, empreendimento da Anglo American. Para atender o objetivo geral, são objetivos específicos:

- Levantar as informações do trecho da mina do Sapo, a partir da literatura acadêmica;
- Utilizar planilhas eletrônicas para o dimensionamento da frota de equipamentos de carregamento e transporte;
- Determinar os indicadores de operação essenciais para o dimensionamento de frota como: número de passes, *payload*, tempo de ciclo, carga de tombamento, dentre outros;
- Determinar quais modais compatíveis de caminhões e equipamentos de carga são aplicáveis, assim como seus portes;
- Fazer uma revisão bibliográfica sobre os conceitos fundamentais para estimação de produtividade de frotas de carregamento e transporte;
- Aplicar em um estudo de caso o modelo desenvolvido para demonstrar os cálculos do dimensionamento de frota.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lavra a céu aberto

Segundo Curi (2017), a mineração está dividida em 4 fases distintas em termos de conceito, embora interligadas em termos de execução. Essas fases são denominadas de prospecção, exploração, desenvolvimento e lavra (incluindo o fechamento de mina). Sendo assim, a lavra, também denominada de exploração, é a etapa que corresponde à aplicação sistemática dos trabalhos necessários para se ter o aproveitamento econômico da jazida. É nessa etapa que ocorrem a perfuração, desmonte, carregamento e transporte de material, sempre objetivando uma operação economicamente viável e segura para os trabalhadores e meio ambiente.

No entanto, a lavra pode acontecer de forma subterrânea ou a céu aberto (Figura 1). Nos métodos a céu aberto, as operações unitárias de lavra são executadas a partir da superfície e os operários trabalham sem confinamento. Nos métodos subterrâneos, as operações unitárias de lavra são executadas no subsolo, pois o minério está a profundidades consideradas inviáveis economicamente para a lavra céu aberto.

Figura 1: Exemplo de operação em lavra a céu aberto.



Fonte: Anglo American (2022).

Segundo Couto Rui, (1990) “entende-se por explorações mineiras a céu aberto, aquelas em que os trabalhos de escavação realizados para o arranque da substância útil estão em contacto com o ar livre, ou aquelas em que os locais de trabalho não são constituídos por escavações cercadas em todo o seu perímetro pelos terrenos encaixantes”. Ainda, segundo o autor, é possível listar as seguintes vantagens dos métodos de lavra a céu aberto, em comparação com os métodos subterrâneos:

- Operação de suporte e lavra mais simples, sem a necessidade de preocupação com ventilação, suporte ao teto da mina e iluminação;
- Menor tempo de espera entre o início das operações do empreendimento e a lavra em si;
- Menor exposição de risco por parte dos operadores (qualidade do ar, maior grau de liberdade, menor exposição a explosões e soterramento);

2.2 Equipamentos de lavra: mina a céu aberto

A seleção de equipamentos de carregamento e transporte deve ser feita de forma interligada, tendo assim um alinhamento entre os portes e características de cada um deles. Esse alinhamento se faz necessário para se alcançar níveis elevados de produtividade, aliados com um menor custo de investimento e operacional. No entanto, segundo Amaral (2008), essa seleção de equipamentos não segue um processo bem definido, uma vez que cada mina possui suas especificidades (características do minério, condições ambientais e topográficas, disposição da jazida, dentre outras). Sendo assim, a influência e interação entre cada uma dessas especificidades pode direcionar a uma necessidade de composição de frota distinta.

2.2.1 Equipamentos de carregamento

Segundo Borges (2013), “equipamentos de carregamento são tipicamente selecionados para corresponder às condições de minas em termos de capacidade necessária, às condições climáticas,

exigências de mobilidade e número de frentes de lavra, ao mesmo tempo”. Dessa maneira, temos que os equipamentos de escavação e carregamento mais empregados no processo de lavra a céu aberto são as escavadeiras hidráulicas (Figura 2) ou a cabo, as carregadeiras sob pneus ou esteiras, as dragas e os *motoscrapers*.

Figura 2: Escavadeira hidráulica *Front Shovel* – Caterpillar 6040.



Fonte: Caterpillar (2022).

Segundo Ricardo e Catalani (2007), os processos de escavação e carregamento podem acontecer, ou não, pelos mesmos equipamentos. É importante ressaltar que a depender do tipo de equipamento utilizado para o carregamento, pode se fazer necessário a aquisição de equipamentos de suporte. Um exemplo disso é a necessidade de tratores (de pneus ou esteira) trabalhando na limpeza de praça de carregamento quando se opta pelo emprego de uma escavadeira a cabo (Escavadeira a cabo – Caterpillar 7495 Figura 3). Essa necessidade decorre da rigidez locacional da escavadeira a cabo, que tem mais restrições de movimentação quando comparada a outras escavadeiras. Caso o mesmo serviço pudesse ser feito por carregadeiras (Figura 4), o serviço de trator seria dispensável.

Figura 3: Escavadeira a cabo – Caterpillar 7495.



Fonte: Caterpillar (2022).

Figura 4: Carregadeira sob rodas – Caterpillar 994K.



Fonte: Caterpillar (2022).

Deve-se analisar, também, as necessidades por locomoção da frota de carregamento. Equipamentos movidos a esteira possuem baixa capacidade de movimentação e demandam de um processo de movimentação mais complexo, principalmente se o equipamento for alimentado pela rede elétrica (como, por exemplo, as escavadeiras a cabo elétricas).

Além dos pontos destacados acima, é importante considerar, no momento de seleção dos equipamentos de carregamento, fatores como a altura da bancada, alcance de descarga e número de passes para atingir a capacidade de carga máxima do equipamento de transporte. A altura de bancada é uma informação a ser adquirida pelo planejamento de lavra; o alcance do equipamento é uma informação relacionada à máquina em si; o número de passes é uma informação referente

ao modal de transporte desejado ou existente na mina. Isso mostra que a seleção de equipamentos envolverá áreas multidisciplinares, ou seja, o projeto da mina, os equipamentos que podem ser adquiridos por um fornecedor e considerações sobre as máquinas que já existem na operação.

2.2.2 Equipamentos de transporte

Apesar de existirem diversos tipos de transporte para movimentação de rochas em projetos mineiros (de forma a atender especificidades de cada mina), os mais comuns são os modais com o auxílio de correias transportadoras, caminhões ou uma combinação de ambos. Conforme o diagrama da Figura 5, temos que o propósito desses sistemas de transporte é levar o material até o seu destino, podendo ser, por exemplo, a estação de britagem ou uma pilha de estéril.

Figura 5: Fluxo de produção em mina a céu aberto.



Fonte: Lopes (2010).

Com o avanço da tecnologia e uma pressão do mercado por caminhões mais produtivos, a indústria de equipamentos pesados para mineração tem desenvolvido modelos com capacidade de carga cada vez maiores. Esse crescimento de porte de equipamentos é exemplificado na Figura 6. Sendo assim, caminhões com capacidade de carga de aproximadamente 400 toneladas (Caterpillar 797F e 798) são frequentemente encontrados em minas de grande porte, pois apresentam custo operacional

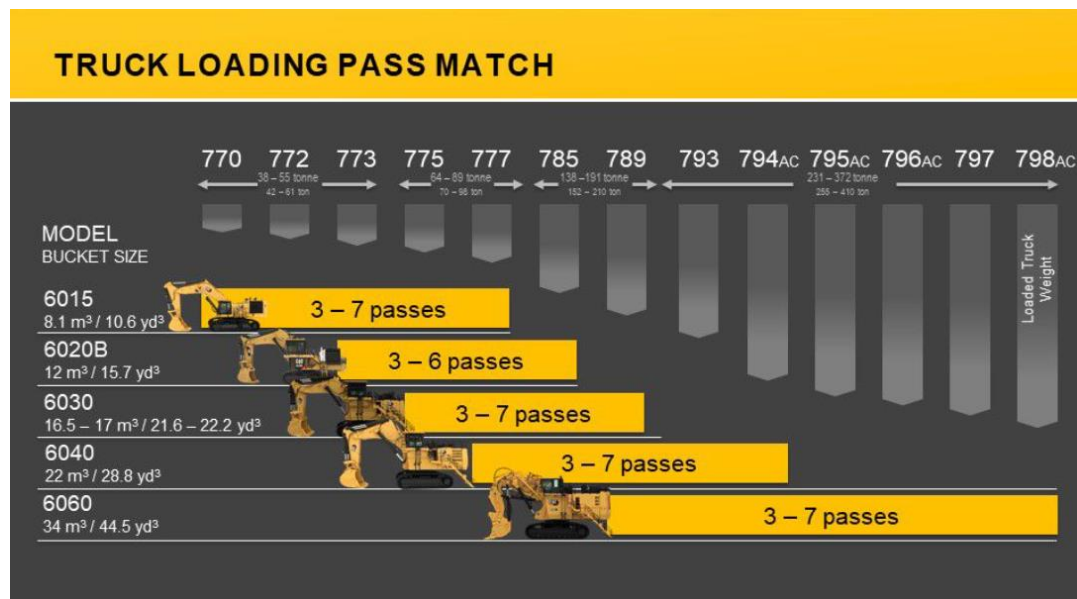
horário atrativo. Conforme dito anteriormente, é imprescindível que se tenha caminhões com um porte equivalente aos equipamentos de carregamento. Caminhões maiores ou menores podem gerar um processo ineficiente e oneroso, além de tornarem a operação mais perigosa para o operador (em caso de sobrecarregamento). Um exemplo desse alinhamento entre equipamentos de carga e transporte é descrito na Figura 7. Note que há uma limitação de passes (variando de no mínimo 3 e máximo de 7), de forma a manter um tempo de ciclo ideal e um custo de operação horário atrativo.

Figura 6: Evolução do porte dos caminhões fora de estrada utilizados na mineração.



Fonte: Caterpillar (2006).

Figura 7: Quantidade de passes ideais entre modelos de escavadeiras hidráulicas Caterpillar e seus caminhões fora de estrada.

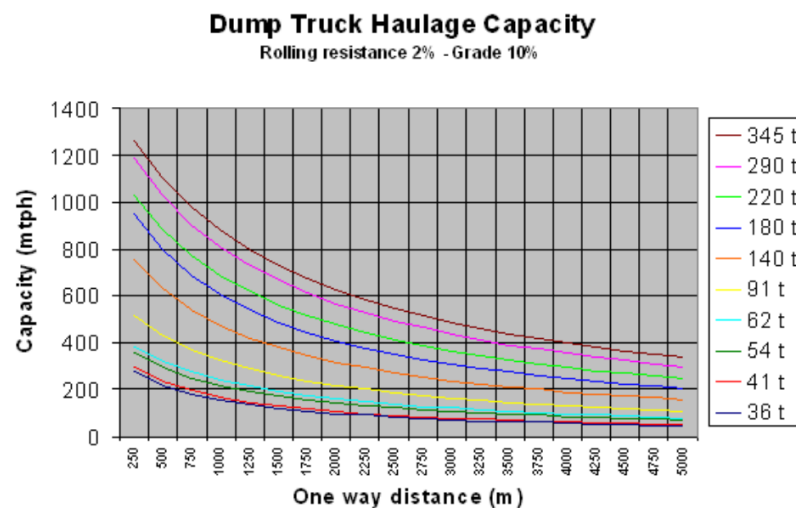


Fonte: Caterpillar (2022).

Segundo Lopes (2010), o estudo de tempos de uma operação de transporte por caminhões pode ser dividido entre fixos e variáveis. Os tempos fixos correspondem aos tempos de carregamento, basculamento, tempo de ida e retorno, assim como os de manobras (necessárias para as operações de carregamento e descarregamento).

Conforme mostrado na Figura 8, quanto maior é a distância a ser percorrida, menor é a capacidade produtiva, independentemente do modelo adotado. Ou seja, caso esteja previsto uma distância de transporte mais longa para uma determinada meta de produção horária, será necessária uma quantidade maior de caminhões ou a adoção de um modelo com uma maior capacidade de carga. É importante destacar que caminhões de maiores capacidades requerem condições de operação mais complexas e, geralmente, estão atrelados a maiores custos de manutenção.

Figura 8: Gráfico da capacidade de carga de alguns caminhões basculantes.



Fonte: Zimmermann e Kruse (2006).

Segundo Runge (1998), com relação a um caminhão de 190 toneladas, seus custos operacionais na Austrália e E.U.A são, em geral, compostos por custos de manutenção e peças de reposição (51%), além de 48,5% relacionados à sua operação, como mostrado na Figura 9. No Brasil, segundo Lages *et al.* (2020), temos que os custos com combustível são os que mais impactam os custos operacionais de uma mina, podendo ser estimado por 59% a 74% dos custos totais. Lages *et al.*

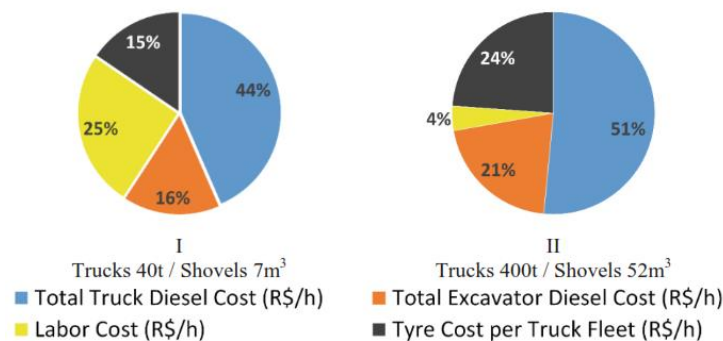
(2020) também afirmam que em uma frota de pequeno porte (com caminhões de 40 t de *payload* e escavadeiras equipadas com caçambas de 7 m³), o investimento com combustível representa 60% do custo total de operação. No entanto, se aumentamos o porte para caminhões de 400 t de *payload*, sendo carregados por escavadeiras equipadas com caçambas de 52 m³ esse custo sobe para 72%. Sendo assim, Lages *et al.* (2020) evidenciam na Figura 10 que os custos com combustível no Brasil são sempre relevantes, independente do porte da frota de equipamentos. No entanto, essa representatividade é mais significativa na frota de maior porte.

Figura 9: Composição dos custos operacionais de transporte por caminhões na Austrália e nos E.U.A.



Fonte: Runge (1998).

Figura 10: Detalhes da distribuição de uma frota de carregamento e transporte de pequeno porte (1) e de maior porte (2).



Fonte: Lages *et al.* (2020).

São destacadas, a seguir, 6 (seis) vantagens de um sistema de transporte por caminhões:

- Flexibilidade operacional, podendo transferir os equipamentos para outras frentes de trabalho;
- A lavra pode ocorrer em diversos níveis, de forma a facilitar a operação de *blendagem* do material lavrado. Isso traduzirá em uma melhor qualidade mineral;
- Facilidade na contratação de mão de obra;
- Menor tempo de comissionamento, uma vez que a entrega desses equipamentos é feita em blocos pré-montados;
- As operações da mina não são interrompidas quando uma unidade de transporte é paralisada por problemas de manutenção. Ou seja, caso se tenha um problema mecânico em um caminhão específico, é possível fazer a substituição do mesmo e seguir com a operação. No entanto, isso não acontece com a mesma facilidade em outros métodos de transporte;
- Agilidade na evacuação dos equipamentos das áreas de risco iminente.

São destacadas, a seguir, 5 (cinco) desvantagens de um sistema de transporte por caminhões:

- Possui eficiência energética relativamente baixa, uma vez que parte dessa energia é gasta com a movimentação do próprio equipamento;
- Tempo de deslocamento vazio longo, uma vez que se retorna para a frente de lavra vazio;
- Consideráveis custos na abertura e manutenção das vias de acesso percorridas pelos caminhões;
- Necessidade de umectação das vias (para diminuição dos particulados finos suspensos no ar). Isso se faz necessário para manter uma melhor visibilidade para o operador do caminhão, além de reduzir os custos de manutenção dele (troca frequente de filtros de ar, por exemplo);
- Risco de paralisação da operação devido às condições climáticas adversas (chuva, neblina ou neve em acesso).

2.2.3 Conceitos básicos para estimativa de produtividade

Segundo Silva (2011), são necessários os seguintes conceitos para se estimar a produtividade de um equipamento de carga e transporte:

- Volume da Caçamba: o volume é uma função da geometria da caçamba, que consiste no espaço vazio contido em seu interior. O volume da caçamba pode ser aumentado para materiais pouco densos, por meio de acoplamentos.
- Empolamento: o empolamento é uma propriedade característica dos solos e rochas. Trata-se da expansão volumétrica desses materiais, ao serem retirados das condições de terreno natural (*in situ*).
- Carga de tombamento (*tipping load*): é a carga máxima, em t, que uma escavadeira ou carregadeira pode levantar sem que haja perda de estabilidade (tombamento).
- Carga útil (*payload*): é a carga máxima, em t, que um equipamento pode ser carregado. Sendo assim, é importante respeitar esse limite e casos de sobrecarga devem ser desencorajados. Além de onerar a manutenção do equipamento, essa prática pode colocar em risco os colaboradores envolvidos em sua operação.
- Disponibilidade Física ou Mecânica: é um indicador de desempenho onde se aponta a disponibilidade de um equipamento para ser operado. Dessa forma, é levado em consideração a carga horária possível de operação, descontado o tempo requerido para manutenção.
- Utilização do equipamento: é a parcela de tempo em que o equipamento se encontra em operação de fato, podendo ser afetado por fatores como filas de carregamento, ausência de operador, deficiência técnica por parte dos operadores, condições climáticas ou preparação inadequada das vias ou frentes de lavra.
- Tempo de ciclo: é o tempo total em atividades unitárias e que são repetidas indefinidamente. Um exemplo disso é o tempo de ciclo de um caminhão, sendo definido pelo somatório do tempo para carregamento, descarga, tempo para monobras e tempos de viagem (ida e volta). Ou seja, considera-se o tempo total desde a atividade inicial, passando pelos processos

intermediários, até que seja iniciado novamente. Isso pode ser aplicado também ao tempo de ciclo de um equipamento de carga, por exemplo. Sendo assim, o tempo de ciclo definido pelo tempo gasto na descarga do material, retorno à frente de lavra, desmonte mecânico e por fim o seu retorno até a unidade de transporte.

- Resistência ao rolamento: é a resistência ao rolamento dos pneus de um equipamento no solo, incluindo os impactos causados pela penetração desse no solo. Ou seja, é a força que precisa ser superada para que o equipamento sob pneus entre em movimento. Essa resistência pode ser afetada pelas condições do terreno em que se move, peso do equipamento, qualidade do pneu, dentre outras. Em geral, terrenos úmidos e com baixa compactação oferecem resistência maior para a rolagem e demandam de um equipamento com maior potência ou torque (resultando em maior consumo de combustível).
- Resistência de rampa: é a resistência oferecida por um aclave à movimentação do veículo, sendo gerada pela componente da força gravitacional. Dessa forma, a resistência total ao movimento de um veículo em um aclave é determinada pela soma da resistência a rolagem mais a resistência da própria rampa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise que será apresentada neste trabalho tem como objetivo uma seleção de portes de máquinas para um trecho virtual de mina. A metodologia adotada seguiu as seguintes etapas:

1. Levantamento dos dados sobre o trecho virtual (artigos científicos, trabalhos acadêmicos, informações disponibilizadas por fabricantes de equipamentos e em sites de busca);
2. Processamento dos dados levantados durante pesquisa (análise crítica);
3. Determinação dos parâmetros do trecho virtual de mina;
4. Validação do trecho virtual;
5. Simulação em planilha eletrônica (Fleet Production and Cost - Caterpillar) para determinação da frota de equipamentos.

Sendo assim, foi feita uma revisão bibliográfica em artigos científicos, teses de mestrado, literatura técnica, dentre outros, sobre os tipos de lavra e suas características, incluindo os equipamentos mais utilizados, suas vantagens e desvantagens. Dentre as diversas fontes consultadas, foi utilizado como referência o trabalho do ARAÚJO (2022) onde se obteve dados da Fase II da Mina do Sapo. Além disso, levantou-se os conceitos básicos para se dimensionar a produtividade de uma frota de equipamentos de carga e transporte.

Após a revisão bibliográfica, foram selecionados os principais parâmetros e informações para que fosse feito a construção de um modelo matemático que fizesse não somente um dimensionamento da frota de equipamentos de carga e transporte, mas também evidenciasse dados sobre a sua condição de operação (tempo de ciclo, número de passes, carga movimentada, velocidade máxima durante o percurso, dentre outros). Por fim, o modelo foi simulado em planilha eletrônica de forma a validar os dados encontrados.

3.1 Premissas para o dimensionamento de frota

O trecho de mina em estudo apresenta as seguintes características:

- Movimentação de 20 milhões de toneladas de minério de ferro por ano;
- Vida útil da mina: 45 anos;
- Tempo anual de operação: 5.600 horas;
- Densidade empolada: 2.300 kg/m³ (2,3 t/m³);
- Densidade *in situ*: 2.800 kg/m³ (2,8 t/m³).

As distâncias do centro de massa da mina até os pontos de basculamento são indicadas na Tabela 1.

Tabela 1: Distâncias de transporte.

Distância (m)	Resistência ao Rolamento (%)	Gradiente de Rampa (%)	Velocidade máxima no trecho (km/h)	Comentários
100	3,25	0	20	Praça de carregamento
5.000	3	6	40	Trecho principal
100	1,5	0	20	Praça de basculamento

Para o estudo foram considerados caminhões fora de estrada Caterpillar 797F (*payload* igual a 358.80 toneladas métricas equipado com balança de 240 m³) e para o seu carregamento a escavadeira hidráulica Caterpillar 6090 *Front Shovel* (caçamba de 52 m³ de capacidade e 95% de fator de enchimento).

Quanto a velocidade máxima de operação dos caminhões em cada trecho, apesar de existir esse limite, por ser uma aplicação em aclave e com carregamento máximo, as máquinas não alcançam tal velocidade no trecho principal (5.000 metros de deslocamento). Sendo assim, observou-se uma velocidade máxima de 18 km/h, conforme informado na tabela abaixo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando as premissas apresentadas acima, após a simulação em planilha eletrônica, obteve-se o seguinte dimensionamento de frota para o trecho de mina em questão, composto por cinco caminhões Caterpillar 797F, sendo carregados por uma escavadeira hidráulica Caterpillar 6090. Os detalhes da frota selecionada podem ser vistos na Tabela 2 e Tabela 3. Assim como encontrado por Araújo, Daniel (2022), o estudo feito no presente trabalho confirma que a frota de carregamento e transporte mais indicada a fase II da Mina do Sapo são os caminhões Caterpillar 797F (cinco unidades) acompanhados de uma escavadeira hidráulica Caterpillar 6090.

Tabela 2: Detalhes operacionais da frota de transporte selecionada para o estudo.

Caminhão CAT 797F	
1. Quantidade	5
2. Tempo total de ciclo (minutos)	28,45
3. Carregamento e troca (minutos)	1,75
4. Trajeto até o britador (minutos)	17,33
5. Descarga e manobra (minutos)	1,2
6. Retorno à zona de carregamento (minutos)	8,17
7. <i>Payload</i> unitário/ciclo (toneladas métricas)	340,86
8. Velocidade máxima em rampa carregado (km/h)	18

O número de ciclos por hora vezes o *payload* unitário por ciclo tem como resultado a produtividade horária do trecho. No caso do trecho virtual, os 5 caminhões resultam em 3.594 t/h. Considerando as 5.600 horas anuais de trabalho, o trecho é responsável por 20 Mta.

Tabela 3 Detalhes operacionais da frota de carga selecionada para o estudo.

Escavadeira Hidráulica CAT 6090	
Quantidade	1
Fator de enchimento	95%
<i>Payload</i> / passe (toneladas métricas)	113,62
Quantidade de passes	3
Tempo de Ciclo (segundos)	30

5. CONCLUSÃO

Após as análises feitas, chegou-se à conclusão de que para o trecho da Mina do Sapo em questão a frota de carregamento ideal seria composta por cinco caminhões Caterpillar modelo 797F, sendo carregados por apenas uma escavadeira Caterpillar modelo 6090. Com essa frota espera-se alcançar uma movimentação de 20 Mta, além de continuar aproveitando a infraestrutura instalada na mina para equipamentos desse porte atualmente. Sendo assim, não será necessário investimentos extras em infraestrutura para se operar caminhões fora de estrada e escavadeiras de grande porte. No entanto, há a chance de que seja necessário adequar a frota de equipamentos de suporte (motoniveladora e tratores de esteira) para que os equipamentos selecionados operem em condições próximas às ideais, de maneira a permitir o máximo desempenho. Pensando em projetos futuros para esse e outros trechos da Mina do Sapo, seria interessante analisar a viabilidade econômica de se implantar o sistema assistência a rampa *Trolley assist* nos equipamentos de carga. Com esse auxílio durante o transporte de material em aclave, espera-se uma menor emissão de poluentes, assim como uma maior velocidade de transporte. Sendo assim, espera-se um menor tempo de ciclo na etapa de transporte. No entanto, além da troca do modelo de caminhão de transmissão mecânica para elétrica, há diversos custos de infraestrutura a serem considerados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, M. **Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto**. 2008. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ANGLO AMERICAN. Imagem retirada do site institucional. Disponível em: <https://www.angloamerican.com/futuresmart/stories/our-industry/mining-explained/mining-terms-explained-a-to-z/open-pit-mining-definition> . Acesso: 12 ago. 2022.

CATERPILLAR. Manual de Produção. 36ª edição. Caterpillar inc. USA. 2006.

CATERPILLAR. Imagens retiradas do site institucional. Disponível em: https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/surface-mining/surface-equipment/hm-shovels.html . Acesso: 12 ago. 2022.

BORGES, Thiago Campos. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração**. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

COUTO, Rui Torres da Silva. **Lavras a Céu Aberto e Equipamentos Principais**. 1990. Dissertação de doutorado apresentado à faculdade de engenharia de minas da Universidade do Porto, 1990.

CURI, Adilson. **Lavra de Minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

LAGES, A. R.; BARBOSA, V. S. B.; CAMPOS, P. H. A.; BARBOSA, R. C.; SILVA, G. R.; CASAGRANDE, P. B.; MAGALHÃES, L. F. Distribution of the main operational costs due to the size of the loading and haulage fleet: Brazilian reality. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 28th, 2019, Austrália. **Proceedings [...]**.

Switzerland: E. Topal (Ed.), 2020, p. 304–311. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33954-8_38

LOPES, J. R. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com o uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto-propelido**. 2010. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual prático de escavação: terraplanagem e escavação de rocha**, 3. ed. São Paulo: Editora Pini, 2007.

RUNGE, I. **Mining Economics and Strategy**. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and exploration, 1988.

SILVA, V. C. **Apostila de Carregamento e Transporte de Rochas**. Ouro Preto: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

ZIMMERMANN, E.; KRUSE, W. **Mobile Crushing and Conveying in quarries: a change for better and cheap production!** Alemanha: [s. n.], 2006.

ARAÚJO, D. J. Alves, **Análise do Porte de Equipamentos para Fase 2 da Mina do Sapo: um estudo de caso**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.