



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**SOCRATES OLIVEIRA MELO**

**ESTUDO DE TEMPOS DE CICLO DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE DE  
MINÉRIO EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

**ARAXÁ/MG**

**2020**

**SOCRATES OLIVEIRA MELO**

**ESTUDO DE TEMPOS DE CICLO DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE DE  
MINÉRIO EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva

**ARAXÁ/MG**

**2020**

SOCRATES OLIVEIRA MELO

**ESTUDO DE TEMPOS DE CICLO DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE DE  
MINÉRIO EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 30 de novembro de 2020



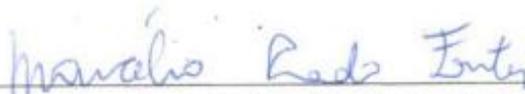
---

**Presidente e Orientador: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues Da Silva**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



---

**Membro Titular: Prof. Me. Allan Erlichman Medeiros Santos**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



---

**Membro Titular: Prof. Me. Marcélio Prado Fontes**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus que me permitiu chegar até aqui e que se fez presente em todos os momentos.

Ao meu pai Rozimar, minhas avós Celina e Maria Aparecida, minha irmã Monaliza, e a Susana por todo apoio e incentivo durante esse percurso.

Aos meus irmãos da “República La Calcita” Breno Heleno, Júlio César, Rodrigo Germano, Heitor Pereira e Caio Kikuchi por todos os momentos vividos e as descontrações durante todos esses anos em Araxá.

Aos meus queridos amigos Maria Luiza, Bianca, Mario, Guilherme, Maria Virginia pelo companheirismo, amizade e paciência durante esses cinco anos de convivência.

Ao meu orientador, Professor Fernando Brandão pelo suporte, paciência e orientação deste trabalho, e por ter contribuído para minha formação.

À CSN Cimentos S.A e colaboradores, em especial ao gerente da mina Fabricio Cavalcanti e ao meu supervisor Marco Túlio pela oportunidade que me foi dada. Agradeço também, ao Fabiano, Moises, Thalles, Gleyson, Samira, Wellington, Walber, Dênis, Décio e Adriano, por todos os ensinamentos e apoio fornecido durante o período de estágio e de realização deste trabalho.

Ao CEFET por possibilitar minha formação e todas às outras pessoas pela ajuda e apoio a esse trabalho de conclusão de curso.

## RESUMO

A alta competitividade do mercado da mineração faz com que as empresas busquem cada vez mais aumentar a eficiência do seu processo produtivo. Dentro da mineração, o carregamento e transporte são as principais operações de produção, além de representar cerca de 80% do custo total de lavra. A mineração Bocaina, destinada à produção de fundentes carbonatados, é uma mineração integrada a uma companhia siderúrgica, onde atualmente a mineração não possui um sistema de despacho automatizado, o que dificulta os trabalhos voltados para controle e otimização dessas operações. Com este intuito, o presente trabalho consiste em medir e analisar os tempos de ciclos da operação, assim como analisar os fatores que impactam no carregamento e transporte do minério, realizar um comparativo dos equipamentos de transporte e de um cenário de produção normal e ideal. Os tempos de ciclos da operação foram bastante variados, entre um intervalo de 7,40 a 13,55 minutos, onde em todos os tempos elementares e por frente de lavra o caminhão Caterpillar 775 se destacou perante o rodoviário Iveco. Observou-se que em 62 horas de operação analisadas em toda a pesquisa, cerca de 20% do tempo foram horas improdutivas, seja por tempos de filas ou atraso na britagem. Foi possível observar e demonstrar como boas práticas operacionais impactavam diretamente na produtividade dos equipamentos, constatou-se em números no cenário de produtividade que uma boa condição operacional influencia diretamente no aumento de produção, por volta de 26%. Logo, avaliar o investimento em um sistema de despacho, poderia trazer resultados significativos para a operação, por meio de trabalhos com foco em melhorias operacionais.

**Palavras-chave:** Carregamento; Transporte; Tempos de ciclos; Operação.

## **ABSTRACT**

The high competitiveness of the mining market makes companies increasingly seek to increase the efficiency of their production process. Within mining, loading and transportation are the main production operations, besides representing about 80% of the total cost of mining. The Bocaina mining, destined to the production of carbonated fluxes, is a mining integrated to a steel company, where currently the mining does not have an automated dispatch system, what makes difficult the works directed to control and optimization of these operations. For this purpose, this work consists of measuring and analyzing the cycle times of the operation, as well as analyzing the factors that impact on the loading and transportation of the ore, making a comparison of the transportation equipment and a normal and ideal production scenario. The cycle times of the operation were quite varied, from 7.40 to 13.55 minutes, where in all the elementary times and in front of the mining the Caterpillar 775 truck stood out before the Iveco road. It was observed that in 62 hours of operation analyzed throughout the research, about 20% of the time were unproductive hours, either by queue times or delay in crushing. It was possible to observe and demonstrate how good operational practices directly impacted on equipment productivity, it was found in numbers in the productivity scenario that a good operational condition directly influences the production increase, around 26%. Therefore, evaluating the investment in a dispatch system could bring significant results to the operation, through work focused on operational improvements.

**Keywords:** Loading; Transport; Cycle times; Operation

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Configuração de um modelo de cava.....	14
Figura 2 - Distribuição dos custos de lavra convencional por caminhão .....	15
Figura 3 - Peso de fatores chave que mais impactam na produtividade por equipamento.....	16
Figura 4 - Movimentos de carregamento realizado por carregadeira de pneus .....	17
Figura 5 - Compatibilidade entre carregadeiras e caminhões. ....	17
Figura 6 - Gráfico relacionando a fragmentação e o custo de cada operação .....	19
Figura 7 - Exemplo de um padrão de largura de carregamento. ....	20
Figura 8 - Manobra de posicionamento .....	21
Figura 9 - Altura de leira de segurança e gradiente de acesso .....	23
Figura 10 - Inclinação de drenagem de acesso.....	24
Figura 11 - Conjunto de equipamentos de carga e transporte. (a) Caterpillar 775; (b) Iveco; (c) Caterpillar 990; (d) Caterpillar 980.....	27
Figura 12 - Questionário da condição da operação.....	29
Figura 13 - Fluxograma de um ciclo total de operação .....	29
Figura 14 - Exemplo de uma medida levantada de DMT .....	31
Figura 15 - Exemplo de um <i>boxplot</i> construído para tratar os dados.....	32
Figura 16 – Tempo de manobra dos equipamentos de transporte.....	35
Figura 17 – Tempo de carregamento dos pares de equipamentos. ....	36
Figura 18 – Números de ciclos de carregamento a) 990 – 775; b) 990 – Iveco; c) 980 – Iveco.....	38
Figura 19 - Tempo de um ciclo de carregamento.....	39
Figura 20 - Tempo de Basculamento .....	40
Figura 21 - Diagrama de causa e efeito de atrasos no basculamento .....	41
Figura 22 -Velocidade de deslocamento cheio por frente de lavra.....	42
Figura 23 – Velocidades do deslocamento vazio por frente de lavra .....	42
Figura 24 - Produtividade por DMT .....	43
Figura 25 – Ciclos por condição de carregamento. ....	44
Figura 26 – Porcentagem de Tempo de fila por horas de operação de cada equipe	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempo de manobra dos equipamentos de transporte.....	35
Tabela 2 – Tempo de carregamento dos pares de equipamentos. ....	36
Tabela 3 - Tempo de basculamento dos equipamentos de transporte.....	40
Tabela 4 - Tempos de ciclos totais e produtividade por frente de lavra .....	43
Tabela 5 - Cenário de produção.....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DF	Disponibilidade física
DMT	Distâncias média de transportes
h	Horas
Km	Quilômetro
m	Metros
m <sup>3</sup>	Metros Cúbicos
Min	Minutos
NRM	Norma Reguladora de Mineração
ROM	<i>Run of Mine</i>
s	Segundos
T	Toneladas
UF	Utilização física

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
2.1	Lavra por bancadas ( <i>open pit mining</i> ).....	13
2.2	Operação de carregamento e transporte na lavra a céu aberto.....	15
2.2.1	Carregamento .....	16
2.2.2	Transporte .....	21
2.3	Sistemas de despacho.....	24
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO: MINERAÇÃO BOCAÍNA</b> .....	<b>26</b>
3.1.1	Método e operações de lavra.....	26
3.1.2	Frota de equipamentos de carga e transporte .....	27
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>28</b>
4.1	Levantamento de informações e dados dos tempos de ciclos.....	28
4.2	Análise estatística básica dos dados .....	31
4.3	Produtividade das frentes de lavra e cenário de produção .....	33
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>35</b>
5.1	Tempo de Manobra.....	35
5.2	Tempo de Carregamento .....	36
5.3	Tempo de Basculamento .....	40
5.4	Velocidade média das frentes de lavra .....	42
5.5	Produtividade unitária dos equipamentos .....	43
5.6	Tempo de Fila .....	44
5.7	Cenário de produtividade .....	46
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido a constante busca pelo aumento de produtividade e eficiência nas organizações, se faz necessário a prática de estudos voltados para as variáveis que influenciam diretamente na produção e nos custos operacionais. Dentro disso, é fundamental que estes estudos sejam implementados em atividades que requerem um alto valor de investimento, como a mineração.

Em mineração, se entende por lavra o conjunto de práticas de operações mineiras que visa o aproveitamento de uma jazida mineral. Desta forma, o ciclo de operações mineiras de lavra convencionais, se fundamenta em quatro operações unitárias: perfuração, desmonte, carregamento e transporte.

O método mais tradicional de carregamento e transporte, em lavra a céu aberto, é a combinação de carregadeira e caminhões. As operações de carregamento e transporte são iniciadas com o deslocamento dos equipamentos até as frentes de lavra, onde os equipamentos de carga carregam os de transporte com minério ou estéril, que seguem com o material até um ponto de descarga, podendo ser britadores, pátios de homogeneização e estocagem, e depósitos de estéril.

As operações de carregamento e transporte são os principais processos de produção da mina, pois impactam diretamente nos índices de produtividade de cada frente de lavra. O tempo de ciclo é um indicador essencial para se medir a produtividade dos equipamentos nas frentes de lavra, se dividindo entre tempos de ciclos fixos e variáveis. Estes que são influenciados por vários fatores, tais como: o grau de fragmentação do material, condições de acessos e praças de carregamento, distância média de transporte (DMT), o método de alocação de caminhões e a habilidade e experiência dos operadores, entre outros.

O conjunto dessas duas operações podem representar cerca de 80% do custo total de lavra (COUTINHO, 2017). Desta forma, para que a empresa possa continuar competitiva no mercado, é imprescindível que sejam tomadas medidas de redução de custo e aumento de produtividade.

A mineração Bocaina, situada entre os municípios de Arcos e Pains, no Estado de Minas Gerais, é destinada à produção de fundentes carbonatados, através da lavra de calcário calcítico e dolomítico. O minério é explotado pelo método de lavra em bancadas (*open pit mining*) em cinco principais frentes de lavra. Os equipamentos utilizados no carregamento e transporte são carregadeiras e caminhões, respectivamente. Atualmente, a empresa não possui um sistema de despacho automatizado, o que dificulta os trabalhos voltados para controle e otimização da operação.

Neste contexto, o presente trabalho propõe medir e analisar os tempos de ciclos da operação, assim como analisar os fatores que impactam no carregamento e transporte do minério. Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Conhecer os elementos dos tempos de ciclos e como as variáveis impactam na produtividade do carregamento e no transporte;
- Conhecer os tempos de ciclos completos de cada frente de lavra, de forma a obter uma maior aderência ao plano de produção;
- Comparar os equipamentos de transporte em relação aos seus indicadores de produção;
- Realizar um comparativo de cenário de produção normal e ideal;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico é abordado alguns tópicos de grande relevância para o entendimento do trabalho, como o método de lavra por bancadas, as boas práticas que impactam diretamente as operações de carregamento e transporte de lavra a céu aberto e uma introdução aos modelos de sistemas de despacho utilizados em minerações. Ademais é dado uma breve contextualização da mineração do estudo em questão.

### 2.1 Lavra por bancadas (*open pit mining*)

Couto (1990), define que explorações mineiras à céu aberto, são aquelas que envolvem trabalhos de escavação ao ar livre e dirigidas a depósitos superficiais. Para Curi (2017), o conjunto de operações mineiras que visa o aproveitamento de uma jazida mineral é denominado de lavra, também podendo ser chamada de exploração, sendo que as fases anteriores são a prospecção, a exploração, desenvolvimento e fechamento de mina.

Segundo Curi (2017), para a definição do melhor método de lavra a ser empregado, deve-se primeiro definir os ciclos de trabalho e a sequência espacial da evolução da lavra, para em função do tempo, viabilizar o melhor aproveitamento da jazida. Desta forma, o método de lavra está correlacionado sempre com a configuração geométrica da jazida e com a sequência de avanços lavra necessário para se obter o volume de minério requerido. Um método de lavra ideal seria aquele que fosse mais econômico, seguro e com o menor impacto ambiental possível.

Nesse sentido, o método de lavra conhecido como lavra por bancadas (*open pit mining*), o material de cobertura do depósito é retirado e armazenado em uma área apropriada, processo conhecido como decapeamento, e quando o minério é exposto, a lavra se dá na forma de bancada, formando uma espécie de cone invertido. As bancadas são desenvolvidas, consecutivamente, de cima para baixo, até se atingir os corpos mineralizados mais profundos (DE CARLI, 2013).

Segundo De Carli (2013), para que haja segurança no desenvolvimento do método, um estudo de estabilidade de taludes deve ser realizado, proporcionando um ângulo de face de bancada e geral do flanco estáveis. As bancadas devem possuir larguras suficientes para acomodar o material desmontado na frente de lavra e ainda, simultaneamente, prover espaços para operações e manobras dos equipamentos, não deixando de levar em consideração a largura para as leiras de segurança e drenagens. A Figura 1 representa uma configuração de lavra por bancadas.

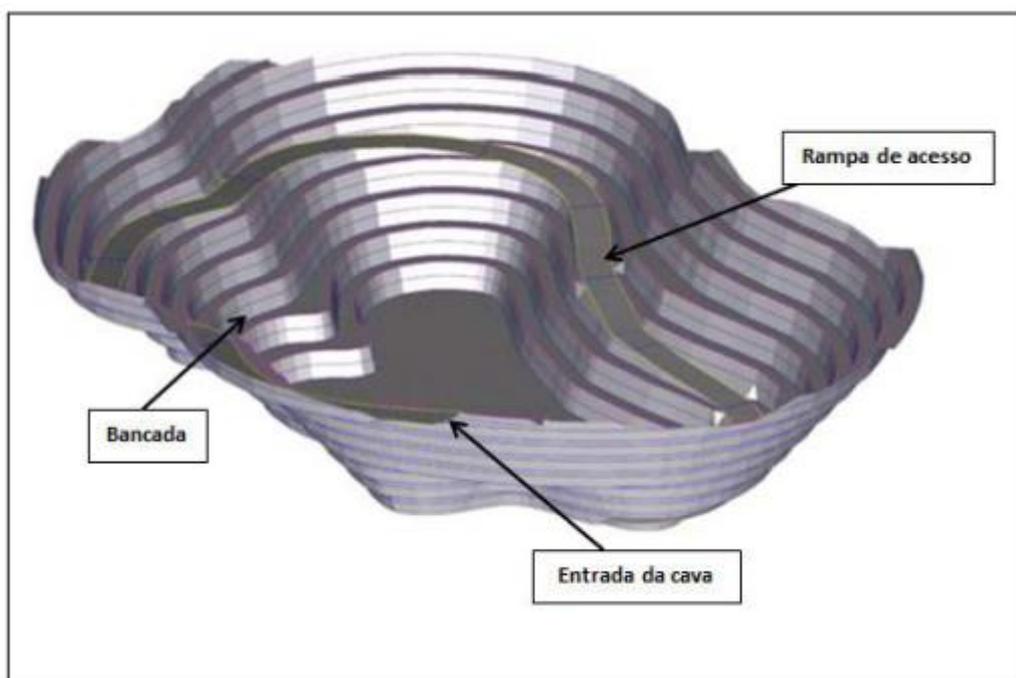


Figura 1 - Configuração de um modelo de cava.

Fonte: De Carli (2013)

Segundo Racia (2016), o ciclo de operações mineiras de lavra convencionais, se fundamenta em quatro operações unitárias: perfuração, detonação, carregamento e transporte. A operação de carregamento é realizada por equipamento como pás carregadeiras ou escavadeiras, distribuídos nas frentes de lavra de acordo com a demanda de produção, os equipamentos de carga carregam os de transporte (caminhões, correias, vagões, etc), que transportam o material até um determinado ponto de descarga, podendo ser britadores, pátios de homogeneização e estocagem, e depósitos de estéril.

## 2.2 Operação de carregamento e transporte na lavra a céu aberto

Segundo Borges (2013), as operações de carregamento e transporte são consideradas as mais críticas e complexas dentro do processo de lavra, representando cerca de 60% de todo custo operacional. Já para Pinto (2007), só a frota de caminhões representa cerca de 50% dos custos de operação na maioria das minas a céu aberto.

A composição dos custos das operações unitárias que operam pelo método convencional de lavra por caminhão, pode ser dividida estatisticamente de acordo com o gráfico da Figura 2, onde só o transporte por caminhão envolve cerca de 52% dos custos, que estão principalmente ligados ao consumo de combustível e manutenção (TRUEMAN, 2001 *apud* LOPES, 2010).

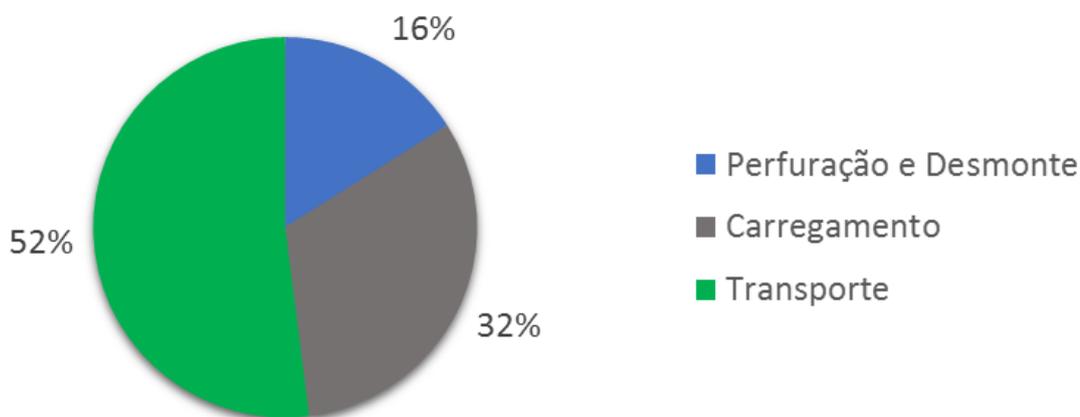


Figura 2 - Distribuição dos custos de lavra convencional por caminhão

Fonte: Adaptado de Lopes (2010)

Em uma pesquisa realizada nos Estados Unidos e Canadá, entre os anos de 1989 a 2004, e divulgada pela revista M&T (2004), citada por Junior (2014), foram analisados os pontos chaves de operação que mais impactam na produtividade dos equipamentos. A Figura 3 mostra os resultados obtidos. De acordo com os dados, os fatores de “baixa supervisão” e “imperícia”, representa 53% dos motivos de baixa produtividade, ou seja, são fatores ligados a falhas operacionais, incluindo o desempenho dos colaboradores.



Figura 3 - Peso de fatores chave que mais impactam na produtividade por equipamento

Fonte: Revista M&T (2004) *apud* Junior (2014)

### 2.2.1 Carregamento

As operações de carregamento e escavação são, normalmente, realizadas por carregadeiras de pneus ou escavadeiras hidráulicas ou elétricas. A operação de carregamento pode ser dividida em três movimentos principais: o primeiro chamado de “enchimento”, acontece quando a concha faz o movimento de avanço até o contato com a pilha de material, o segundo movimento denominado de “içamento”, acontece quando a caçamba é cheia e elevada, já o terceiro movimento, chamado de “giro”, ocorre com a caçamba cheia sendo girada lateralmente para bascular a carga (HUSTRULID, 1999 *apud* BOTELHO, 2014, pag. 24).

Segundo Ozdemir (2007), *apud* Botelho (2014), pode-se ainda identificar outros dois movimentos: o esvaziamento da caçamba e o giro com a caçamba vazia, obtendo assim um ciclo completo, iniciando com o enchimento e terminando quando a caçamba retorna vazia ao ponto de partida. A Figura 4 demonstra os movimentos realizados por uma carregadeira de pneus.

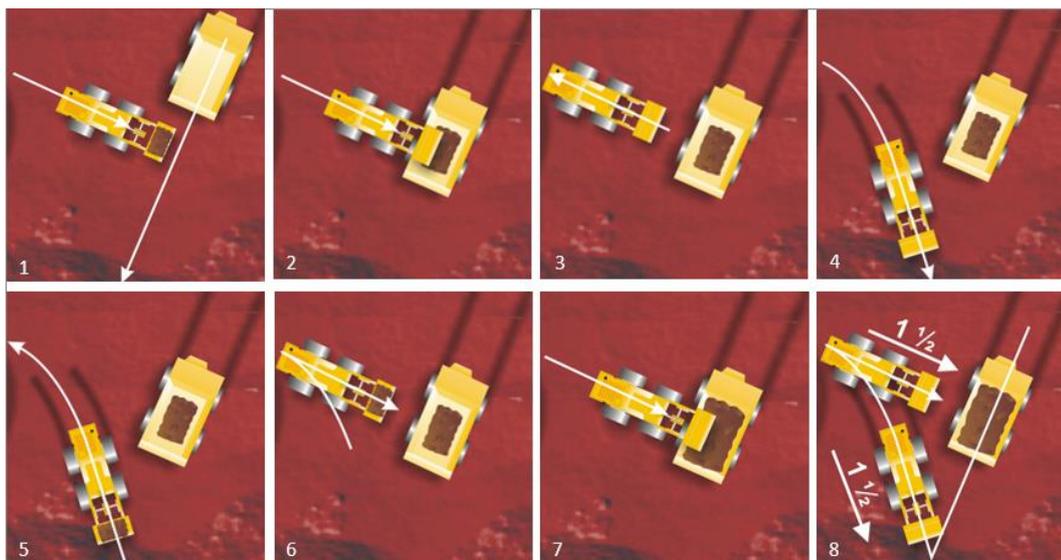


Figura 4 - Movimentos de carregamento realizado por carregadeira de pneus

Fonte: Adaptado de CSN (2020)

Em uma mina convencional, a sequência de operações de lavra é perfurar, detonar, carregar e transportar, sendo que, enquanto uma frente está sendo perfurada, outra pode ser detonada e uma terceira estar em carregamento. Para que isso se desenvolva bem, as mineradoras devem possuir uma frota de equipamentos bem dimensionados e que se revezem nas frentes de lavras. A compatibilidade entre os equipamentos de lavra de toda a frota é um dos fatores primordiais para que se alcance um menor tempo de ciclo, e conseqüentemente, uma maior produtividade. A Figura 5 exemplifica um padrão de compatibilidade entre as carregadeiras e caminhões Caterpillar (SOUZA; CABRAL, 2016).

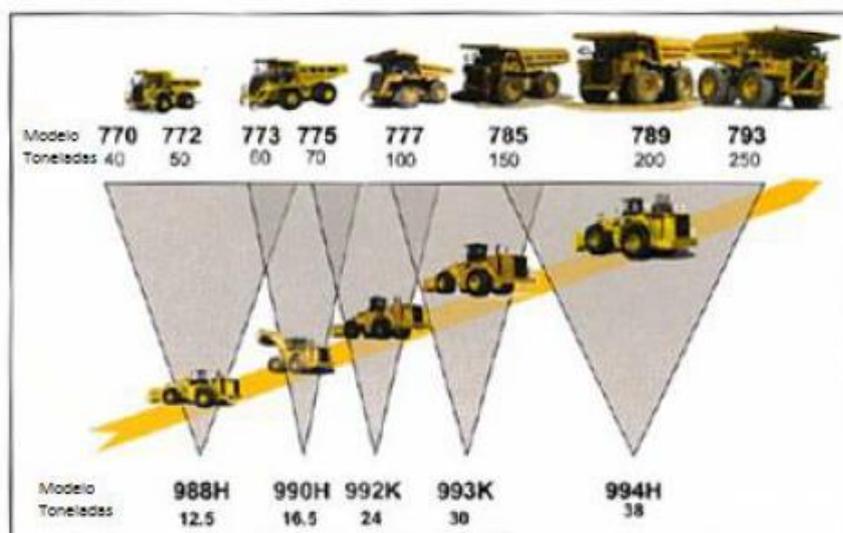


Figura 5 - Compatibilidade entre carregadeiras e caminhões.

Fonte: Caterpillar (2004)

Cada modelo de carregadeira e caminhão possui uma capacidade específica de carga e, desta forma, pode-se determinar o número de passes (ciclos), necessários para que seja realizado por completo o carregamento da caçamba do caminhão. Segundo Peroni (2015), uma relação ótima de número de ciclos estaria entre três a seis passes.

Segundo Silva (2009) *apud* Borges (2013), existem alguns fatores que fazem com que um número menor de ciclos seja preferível:

- Se o tamanho da caçamba da unidade de carga não for muito pequeno em comparação ao equipamento de transporte, pois resultaria em impactos sobre a suspensão e na estrutura do veículo, além de possível derramamento excessivo de carga;
- Se o tempo de carregamento não for muito curto que faça ocasionar a demora de chegada da unidade de transporte, pois resultaria na ociosidade da unidade de carregamento.

Portanto, o número de unidades de transporte deve ser equilibrado com a unidade de carregamento, pois, se esse número for muito pequeno, ocorrerá ociosidade nas unidades de carregamento e, caso contrário, é provável que ocorra filas dos equipamentos de transporte.

Segundo Coutinho (2017), o carregamento representa uma parte considerável em relação aos custos de operação de mina. Essa operação unitária influencia diretamente em todo o ciclo de produção devido a operação estar conjugada com o transporte, sendo que, um carregamento ineficiente e com baixa produtividade irá reduzir a produção nas minas. Deste modo, um tempo de ciclo ideal para cada carregamento com pás carregadeiras estaria dentro de um intervalo de 28 a 42 segundos. Um bom tempo de ciclo é em função de alguns principais fatores, como: a fragmentação do material, a largura das praças, nivelamento dos pisos nos pontos de carga, o posicionamento adequado dos caminhões nas manobras e a habilidade e experiência dos operadores, entre outros aspectos.

Na etapa de fragmentação do material, que está conjugada inteiramente com a etapa de carregamento, é desejável que se tenha uma distribuição granulométrica uniforme,

sem que haja excesso de matacos (bloco de rocha compacta) ou de finos. Caso a distribuição granulométrica não esteja de acordo com a requerida, o desempenho dos equipamentos e das etapas posteriores podem ser afetados. Desta forma, para se otimizar qualquer etapa operacional, o ideal é considerar todo processo, como um único processo, de modo que todas as etapas seriam sincronizadas uma com a outra.

A Figura 6 mostra o quanto os custos de cada operação unitária estão relacionados entre si, principalmente, pelo grau de fragmentação do material, desta forma, existe um ponto ótimo do custo total de operação, quando as etapas de perfuração, desmonte, carregamento e transporte, são vistas como um só processo (BOTELHO, 2014).

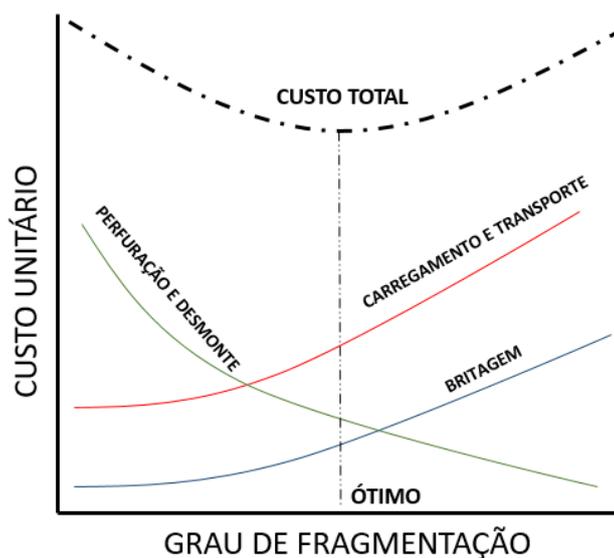


Figura 6 - Gráfico relacionando a fragmentação e o custo de cada operação

Fonte: Adaptado de Botelho (2014)

Para Hustrulid (1999), *apud* Botelho (2014), o material pouco fragmentado, aumentará os esforços dos equipamentos de carregamento, assim como o tempo de operação de carregamento, acarretando em maior quantidade de eventos de manutenção dos equipamentos e, conseqüentemente, aumentará os custos de manutenção e reduzirá a produção. Desta, forma, a eficiência do desmonte deve ser medido pela cominuição da bancada, e não pela quantidade de explosivos consumidos.

As condições de praça de carregamento são essenciais para que se tenha uma manobra adequada, segura e produtiva. A largura da praça deve ser suficiente para

acomodar o material do desmonte e, ao mesmo tempo, que comporte as carregadeiras e caminhões posicionados na praça para fazer a retirada do material. Para Coutinho (2017), o padrão de largura de cada mina, vai depender, principalmente, das dimensões da carregadeiras e caminhões, além da largura de manobra, afastamento do talude, entre outros parâmetros, conforme ilustrado na Figura 7.

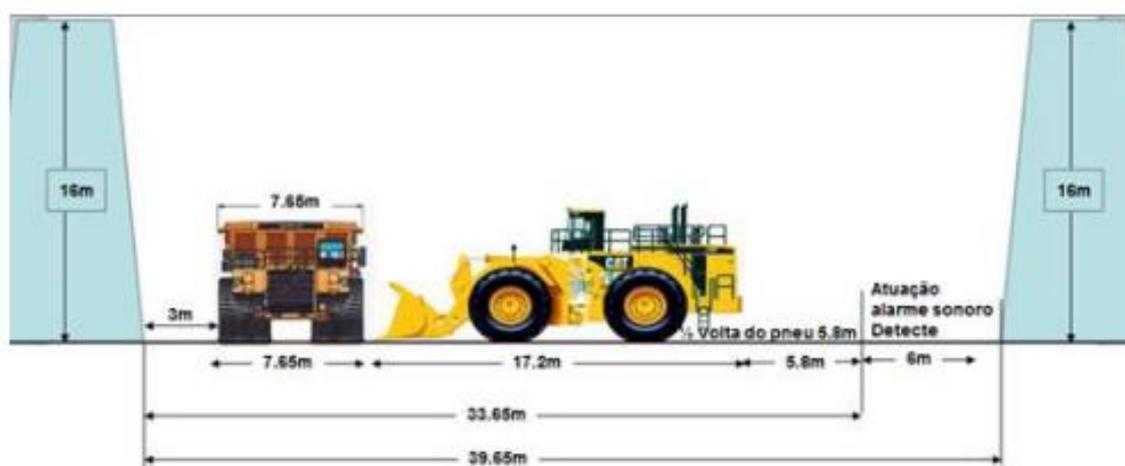


Figura 7 - Exemplo de um padrão de largura de carregamento.

Fonte: Coutinho (2017)

O nivelamento do piso nos pontos de carga é outro fator relevante que afeta no desempenho do carregamento, onde esse fator é determinado pelo plano de fogo e pela subfuração. O baixo controle sobre o piso pode gerar repés e dificuldades para carregar. O piso deve ser mantido o mais uniforme possível, livre de obstruções, maticos e fragmentos de ultralançamentos e, também, deve-se evitar o acúmulo de água. Caso contrário, a vida útil dos pneus e a tração dos equipamentos serão reduzidos (HANSPAL, 1995 *apud* BOTELHO, 2014).

Segundo Coutinho (2017), para se obter um menor tempo de ciclo e um melhor enchimento da caçamba é imprescindível que seja realizado uma padronização do método de manobra e que também sejam feitos treinamentos intensivos para melhorar as habilidades dos operadores. Técnicas de enchimento e de posicionamento são itens essenciais para melhorar a manobra de carregamento.

A carga deve ser realizada de forma centralizada, evitando torções e esforços excessivos nas suspensões e chassi dos caminhões, além de evitar o risco de tombamento; caminhões devem ser posicionados em um ângulo de  $45^{\circ}$  em relação à frente de lavra, pois desta forma se obtém tempos de ciclos mais rápidos; o deslocamento da carregadeira deve ser limitado 1,5 vezes a volta do pneu, de forma reduzir o tempo de deslocamento (COUTINHO, 2017). A Figura 8 ilustra o posicionamento dos equipamentos perante a frente de lavra.

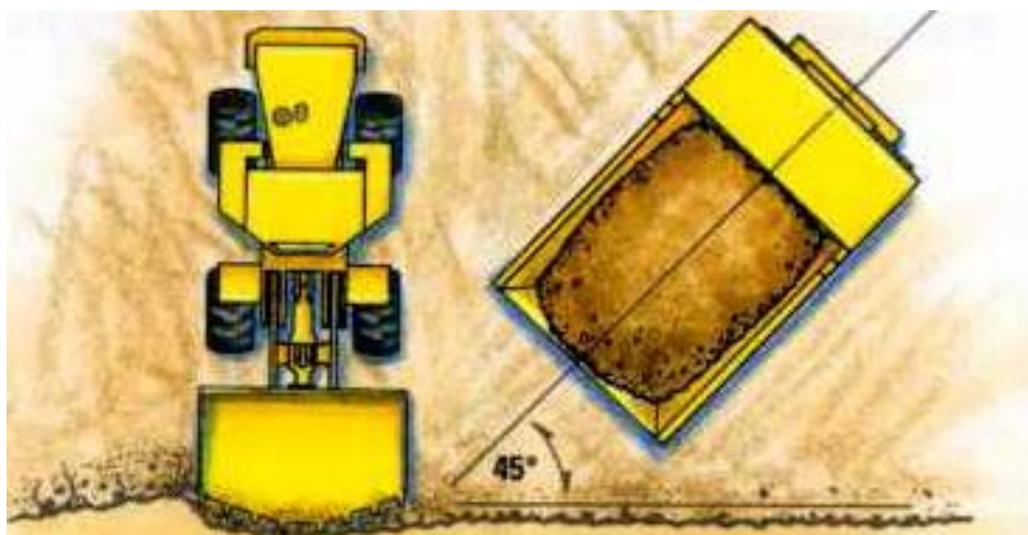


Figura 8 - Manobra de posicionamento

Fonte: CSN (2020)

### 2.2.2 Transporte

Segundo Racia (2016), na mineração existem vários métodos e sistemas de transporte de material, entretanto os mais utilizados são o transporte por caminhão e correia. O transporte por caminhão destaca-se como o mais utilizado em todo o mundo, pois com o advento da mecanização, fez alavancar ainda mais a capacidade de produção, desenvolvendo equipamentos cada vez mais modernos e automatizados.

Segundo Kolonga *et al.* (1993) *apud* Rodrigues (2006), o transporte por caminhão é a maneira mais comum utilizada para movimentar minério e estéril em minas a céu aberto, mas usualmente é a operação de lavra mais onerosa. Logo, uma pequena redução percentual nos custos com transporte resulta em economias significativas.

O transporte de material realizado por caminhões representa a maior parte dos custos operacionais de lavra, desta forma, é importante que se busque aumentar cada vez mais a eficiência operacional nesse processo. Para tal, existem algumas condições que são essenciais para um bom desempenho na operação dos caminhões, como a padronização da largura, inclinação e condições de acesso, alocação acurada e controle de despacho de frota, treinamento e capacitação dos motoristas, entre outros (COUTINHO, 2017).

Segundo Junior (2014), o ciclo de um caminhão pode ser dividido entre tempos de ciclos fixos (tempo de fila de carregamento e basculamento, tempo de manobra no carregamento e basculamento e tempo de carregamento) e tempos de ciclos variados (deslocamento vazio e deslocamento cheio).

Para Coutinho (2017), o tempo de ciclo é um indicador essencial para se medir a produtividade no transporte. Segundo Santos (2018), a produção e a produtividade dos equipamentos de carregamento e transporte são dependentes de fatores como a disponibilidade, utilização e eficiência dos equipamentos, condições de rampas e acessos, distância média de transporte (DMT) e o método de alocação de caminhões.

Segundo Reis (2014), as estradas de mina foram por muito tempo pouco consideradas para um sucesso na atividade mineira. Porém, hoje, sem dúvidas, se tem consciência da importância que uma boa manutenção nas vias de acessos traz para a operação de transporte. Uma estrada em boas condições de operação é sempre mais segura, com um menor tempo de ciclo, sendo assim com uma alta produtividade de frota.

Segundo Santos (2018), a distância entre as frentes de lavra e os depósitos de estéril e britador, impactam significativamente no ciclo de operação de carregamento de transporte. Uma DMT muito elevada implica em um maior tempo de ciclo, portanto um maior custo operacional. Além disso, um tempo de ciclo muito levado pode fazer com que as carregadeiras fiquem ociosas, impactando na produtividade.

A eficiência de uma frota de transporte depende do seu tamanho e das distâncias transportadas. Quando os caminhões não são suficientes, os equipamentos de carga

ficam ociosos e quando existem muitos caminhões o tamanho das filas nos equipamentos de carga aumenta (RODRIGUES, 2006).

A Norma Reguladora de Mineração para circulação e transporte de pessoas de materiais (NRM-13), apresenta requisitos mínimos para as vias por onde ocorra tráfego de equipamentos de transporte, como: deve haver sinalização para que os limites das bancadas usadas como estradas sejam visíveis tanto durante o dia como durante a noite; a largura mínima da estrada deve ser 2 vezes a largura do maior veículo para estrada em pista simples e 3,5 vezes em estradas de pista dupla; quando houver risco de queda, devem ser construídos leiras laterais de proteção com altura mínima igual a metade do pneu do maior veículo que trafega pela via; a inclinação das rampas é recomendando um gradiente máximo de 10%. A Figura 9 ilustra a altura de leira de segurança e o gradiente de acesso (BRASIL, 2001).

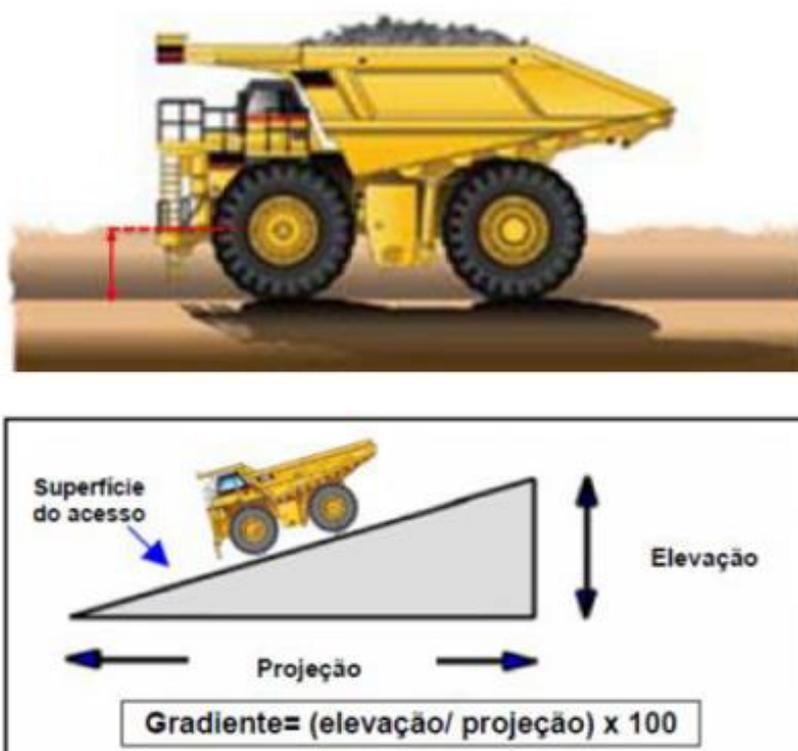


Figura 9 - Altura de leira de segurança e gradiente de acesso

Fonte: Adaptado de Coutinho (2017)

Segundo Reis (2014), o contato de água superficial e subterrânea com o pavimento da estrada pode provocar anomalias e defeitos na mesma, fazendo com que seu

direcionamento e eventual remoção, se tornem, muitas vezes necessários. Desta forma, um projeto de acesso deve também contar com um projeto de drenagem que promova um eficiente escoamento superficial através de inclinação transversal da estrada, além de canaletas, canais e drenos. A Figura 10 mostra um exemplo de inclinação de drenagem de acesso.

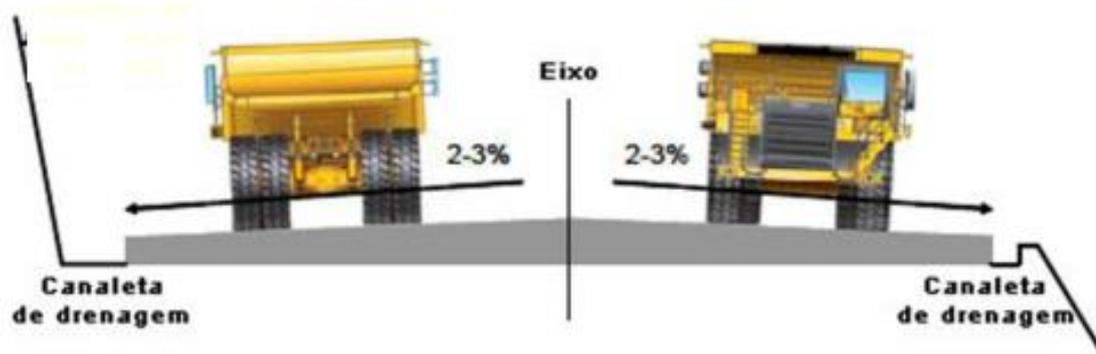


Figura 10 - Inclinação de drenagem de acesso

Fonte: Adaptado de Coutinho (2017)

A manutenção de acessos deve ser considerada uma atividade essencial para proporcionar uma maior segurança no tráfego por caminhões e um menor custo no consumo de pneus e combustível. Essa atividade é realizada por equipamentos auxiliares, dentre eles o trator de esteira, trator de pneus, caminhões pipa, motoniveladoras e rolo compressor. Em um estudo econômico realizado por Corrêa (2016), foi concluído que era viável economicamente fazer a aquisição de equipamento auxiliares, devido os benefícios relacionados a redução de custo com pneus e diesel. Além disso, equipamentos auxiliares são indispensáveis para as manutenções rotineiras nos acessos, pois durante as operações podem ocorrer defeitos nas estradas, como buracos na pista e blocos e/ou maticos soltos, poeiras, entre outros, defeitos que reduz a produtividade dos equipamentos, podendo também causar danos aos mesmos.

### 2.3 Sistemas de despacho

Nas minas a céu aberto utilizam dois tipos de alocação de caminhões: alocação estática e alocação dinâmica. Na alocação estática, os caminhões são fixados a um

ponto de carga e um ponto de descarga, ou seja, o deslocamento acontece apenas entre os dois pontos por um determinado período de tempo. Já na alocação dinâmica, a cada ciclo completo, o caminhão pode ser realocado para outras frentes de lavra, de acordo com os critérios já estabelecidos em um *software* de despacho (RODRIGUES, 2006).

Segundo Rodrigues (2006), a alocação estática ainda é o método mais utilizado nas minerações, geralmente em minas de pequeno e médio porte, por não apresentar a necessidade de um *software* que opere com um sistema automático de alocação. Entretanto, esse método proporciona uma menor produtividade, devido a fila de caminhões, e também na ociosidade dos equipamentos de carga.

Para Pinto (2007), os termos “alocação dinâmica” e “despacho” são equivalentes, ou seja, o termo despacho refere-se à alocação dinâmica de caminhões e equipamentos de carga, devido a utilização da alocação dinâmica requerer sempre o uso de um sistema de despacho.

De acordo com Rodrigues (2006), os primeiros sistemas de despacho foram manuais. Nesses sistemas, o operador através de suas próprias observações e tomadas de decisões, a partir de um ponto estratégico da mina, fazia a alocação dos equipamentos através de comunicação via rádio. No início dos anos 70, esses sistemas já passaram a ser semi-automatizados, onde minicomputadores eram usados para registrar o estado dos equipamentos e sugeria a alocação, entretanto, o operador ainda fazia a orientação. Já no final dos anos 70, os sistemas de despacho automatizados foram desenvolvidos, sistemas que tem a habilidade de alocar diretamente o caminhão à tarefa.

Segundo Junior (2014), o objetivo principal do despacho computadorizado é maximizar o tempo produtivo da mina, minimizar o número de caminhões necessário para o transporte, maximizar a produção dos equipamentos de carga através da redução de sua ociosidade e atender aos padrões de qualidade da usina de beneficiamento. Segundo Tu e Hucka (1985), *apud* Junior (2014), tem sido observado acréscimo de 3% a 15% na produtividade do equipamento de transporte nas operações das minas que implementaram sistemas de despacho computadorizados.

### 3 ESTUDO DE CASO: MINERAÇÃO BOCAÍNA

A empresa do estudo de caso é uma mineradora integrada no processo siderúrgico de uma usina do mesmo grupo, voltada para produção e exploração de calcários calcíticos e dolomíticos. A mineração Bocaína, como é conhecida, está em operação desde 1972, sendo responsável por abastecer a usina de fabricação de aço com seus fundentes carbonatados.

Como uma forma de aproveitar melhor seus recursos minerais, iniciou-se em 2011 o *start-up* de produção de clínquer (matéria prima para o cimento), tendo como uma das grandes vantagens de se produzir fundentes concomitante com a fabricação de clínquer: a possibilidade de utilizar qualquer tipo de material proveniente da mina, planejando eliminar a geração de estéril dos próximos anos, bem como consumir os estoques gerados até então. Já em 2016 deu-se início o *start-up* da fábrica de cimentos.

A mineração possui reservas suficientes para sustentar suas operações até o ano de 2065, considerando: uma produção média anual de 7,5 Mt de ROM, todas as restrições ambientais, limites do direito minerário e a geometria máxima da configuração de lavra.

#### 3.1.1 Método e operações de lavra

O método de lavra utilizado é a céu aberto em bancadas. As bancadas operacionais são de 15 metros de altura, podendo ser utilizados, em situações específicas, bancadas de 10 metros de altura, uma vez que a geometria da jazida apresenta variações pontuais, o que pode requerer a realização de furos mais rasos para a regularização das frentes de lavra. Em relação aos parâmetros geotécnicos, a cava apresenta ângulos de face dos bancos de lavra de 89°, ângulo geral da cava de 45°, largura da berma operacional de 20 m e largura operacional das praças de 50 m.

Assim como na maioria das minas a céu aberto por bancadas, as operações de lavra são: perfuração, desmonte, carregamento e transporte. Além de serviços de

infraestrutura e apoio, onde a mineração conta com apoio operacional de motoniveladora, caminhão comboio, caminhões pipa, retroescavadeira, escavadeira e veículos leves.

A empresa opera 24 horas por dia, com regimes de trabalhos de três turnos de 8 horas. Com um total de 4 turmas, enquanto três trabalham, uma folga de acordo com a escala pré-determinada. Cada turma conta com o apoio de um supervisor de produção, responsável por alocar os equipamentos para as frentes de lavra, dar suporte aos operadores em deslocamento, entre outras funções.

### 3.1.2 Frota de equipamentos de carga e transporte

Atualmente, na mineração Bocaina, os serviços de carregamento são realizados com o uso de três carregadeiras Caterpillar 990, com caçamba de 8,4 m<sup>3</sup>, e três carregadeiras Caterpillar 980, com caçamba de 4,2 m<sup>3</sup>. Já o transporte é realizado por dois caminhões fora de estrada Caterpillar 775 e três caminhões rodoviários 8 x 4 (Iveco), com capacidade de transportar 60 e 34 toneladas, respectivamente. A Figura 11 demonstra os modelos de equipamentos de carga e transporte utilizados na mina. Além da frota própria, a mineradora sempre conta com o apoio de empresas terceirizadas, que também auxiliam na carga e transporte do minério.



Figura 11 - Conjunto de equipamentos de carga e transporte. (a) Caterpillar 775; (b) Iveco; (c) Caterpillar 990; (d) Caterpillar 980.

Fonte: Autoria própria (2020)

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Levantamento de informações e dados dos tempos de ciclos

Primeiramente, procurou-se conhecer como funcionava o ciclo de operação da frota de carregamento e transporte. Sendo assim, houve um acompanhamento junto à operação por uma semana antes da pesquisa, para observar como era a rotina e práticas operacionais utilizadas. Em um segundo momento, tendo posse do conhecimento da operação, foi possível desenvolver a metodologia deste trabalho.

O período utilizado para levantar os dados e as informações foi entre 17 de fevereiro à 20 de março de 2020, onde foram levantados os seguintes dados:

- Tempos de ciclos de carregamento e transporte
- Níveis de praça (708, 722, 732, 743 e 758)
- Tipo de equipamento de carregamento (Carregadeiras Caterpillar 980 e 990)
- Tipo de equipamento de transporte (Caminhões fora de estrada 775 e rodoviário)
- Linha de britagem 1 e 2
- Números de ciclos de carregamento
- DMT
- Turno

A atividade foi realizada com o auxílio de um cronômetro, prancheta, caneta e folha de observações. Além disso, foi realizada dentro dos equipamentos de transporte, fazendo com que os dados fossem mais precisos, pois a partir do momento que um elemento do ciclo de carregamento foi encerrado, por exemplo, o cronômetro foi novamente ativado. Ainda vale ressaltar que a pesquisa não levou em consideração, as paradas de troca de turnos, abastecimento, refeição, manutenção, entre outras.

A pesquisa foi finalizada durante 62 horas de operação, a partir da qual foram obtidos 295 tempos de ciclos. Após a pesquisa, foi montado um banco com mais de 5000 dados. Além da coleta de dados, no decorrer da atividade foi realizado um questionário com os operadores em relação ao carregamento e transporte, conforme mostrado na

Figura 12. Com as informações obtidas pelo questionário foi possível conhecer melhor a operação e, ainda, observar cenários importantes nos resultados e discussões.

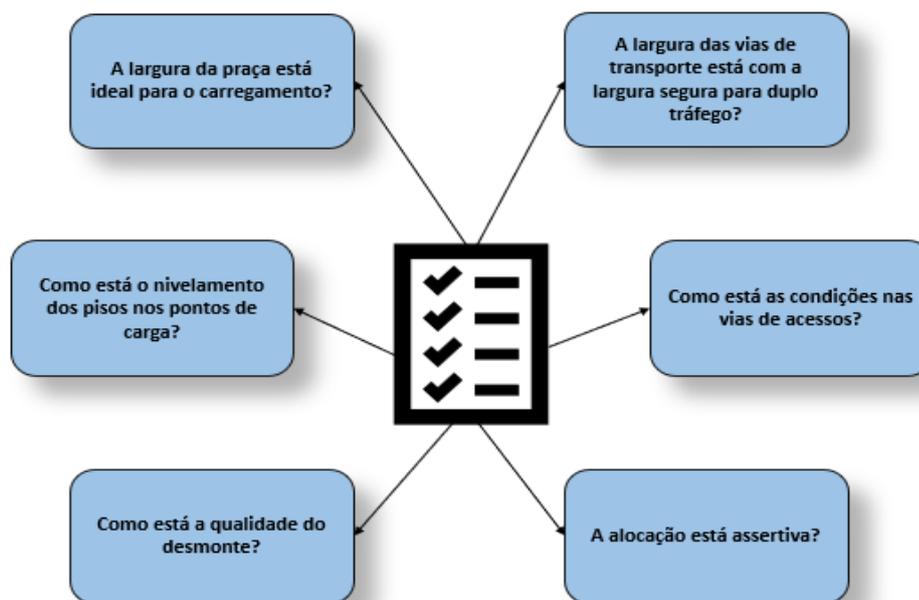


Figura 12 - Questionário da condição da operação

Em relação aos tempos de ciclos, eles foram coletados por componentes de tempos fixos e variados, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 13. Desta forma, cada tempo elementar enumerado na figura representou uma parte de um ciclo total da operação.

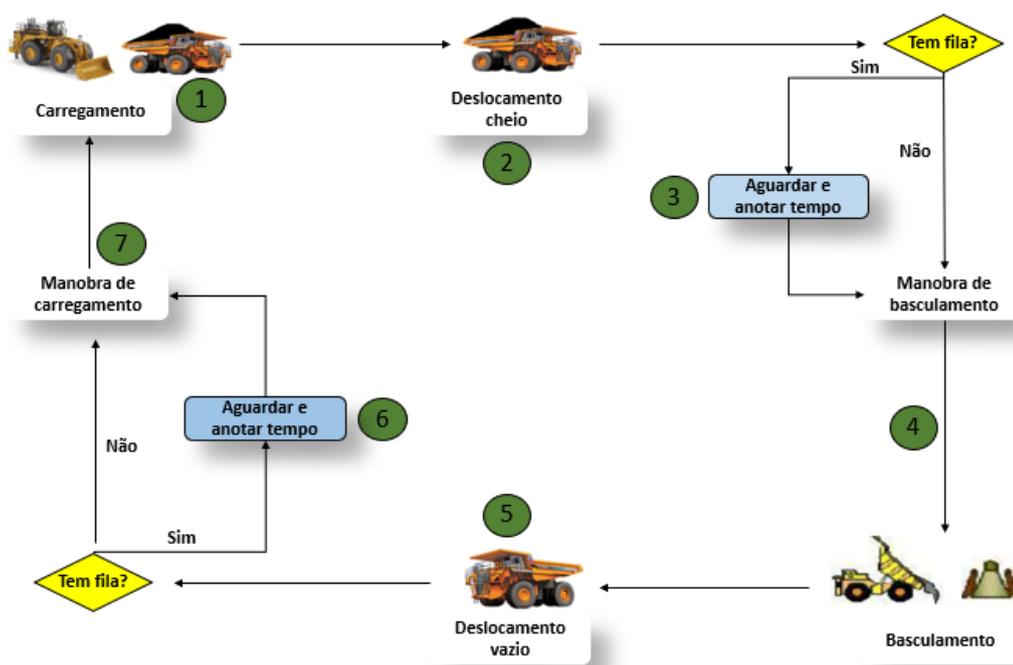


Figura 13 - Fluxograma de um ciclo total de operação

O tempo de manobra de carregamento foi o indicador referente ao tempo gasto pelo equipamento de transporte durante o posicionamento perante ao equipamento de carga. Ele foi medido a partir da chegada do caminhão na praça e foi finalizado a partir do momento de início do carregamento.

O tempo de carregamento foi medido a partir do fim de manobra do equipamento de transporte e foi finalizado quando o mesmo atingiu a sua carga nominal e foi liberado pelo operador do equipamento do carregamento.

O tempo manobra de basculamento e básculo foi medido a partir da chegada do equipamento de transporte ao ponto de basculamento, onde foi composto pela manobra e início do basculamento, até a descarga do material e retorno para a posição inicial.

O tempo de deslocamento cheio foi medido a partir do momento que o caminhão foi liberado pelo operador do equipamento de carregamento. Já o tempo de deslocamento vazio foi contabilizado assim que o caminhão voltou a posição inicial de básculo para sair para a frente de lavra.

O tempo de fila foi contabilizado quando os equipamentos de transporte chegaram na praça de carregamento ou de basculamento e haviam caminhões aguardando para realizar a operação. Além disso, foi considerada uma margem de tempo de 60 segundos para considerar se a frente de lavra ou o britador tinha fila ou não, pois como era utilizado uma alocação estática, ter um sincronismo ótimo da saída de equipamento e entrada de outro era considerado difícil, em síntese os 60 segundos foi uma margem de tolerância de espera.

Por não possuir um sistema de despacho para fazer a medição de carga média utilizada, e tampouco balanças instaladas em cada caminhão, foi utilizado a carga nominal dos equipamentos de transporte, para a realização dos cálculos de produtividade dos caminhões fora de estrada Caterpillar 775 e o rodoviário Iveco.

As distâncias médias de transportes (DMT's), que são as distâncias entre as frentes de lavras e os britadores, foram medidas a partir do ponto em que encontrava o

carregamento até o britador de destino, através do AutoCAD, como ilustrado na Figura 14.

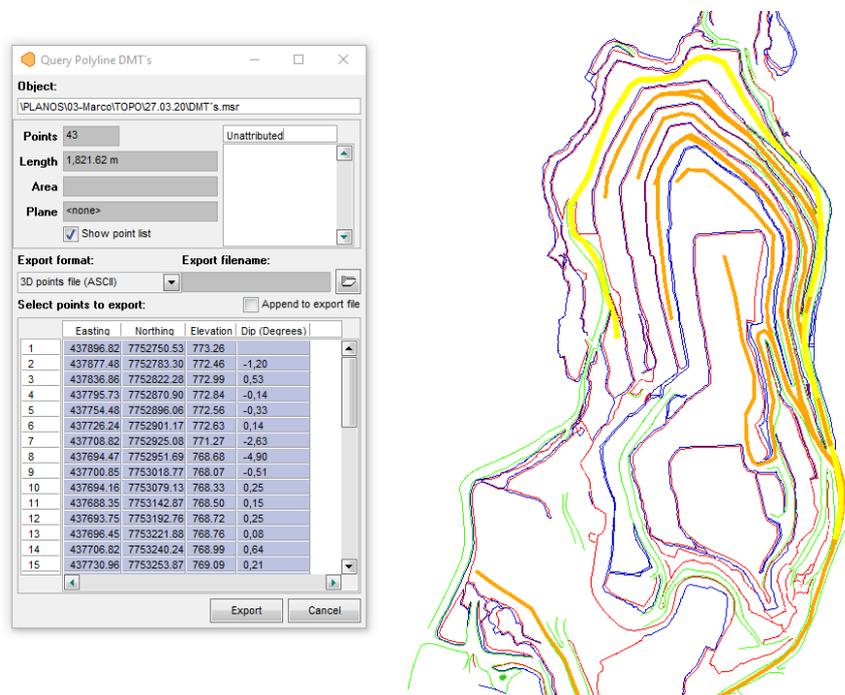


Figura 14 - Exemplo de uma medida levantada de DMT

## 4.2 Análise estatística básica dos dados

Como em todas as pesquisas que envolvem levantamento de dados, é necessário que haja uma avaliação estatística dos dados coletados, a fim de verificar se os mesmos são representativos de uma população amostral. Logo, foi realizada uma estatística básica dos dados, para avaliar se os mesmos eram representativos, utilizando como ferramentas de análise o Excel e o Minitab.

Em um primeiro momento foi utilizado o Minitab para confeccionar diagramas de caixas (*boxplots*), uma ferramenta que permitiu visualizar a distribuição de valores e, principalmente, os valores discrepantes dos dados (*outliers*). Além disso, o *boxplot* também é uma disposição gráfica comparativa, onde é possível analisar o quão os dados estão dispersos, avaliando a variabilidade dos mesmos, se há uma simetria, ou seja, se a mediana está no centro do retângulo do gráfico, ou até mesmo se os dados estão assimétricos, etc.

Em suma, os *boxplots* foram construídos para avaliar os *outliers* em cada análise de dados, pois os dados discrepantes influenciam diretamente na média aritmética e o desvio padrão. Desta forma, foi desconsiderado os *outliers* para os cálculos de média e desvio padrão, até um aparo de no máximo de 10% de dados, de forma não diminuir tanto o número e nem mesmo tirar a representatividade amostral. A Figura 15, mostra um exemplo de um *boxplot* confeccionado, onde é possível observar os *outliers*, a variabilidade dos dados, a média e a mediana amostral.

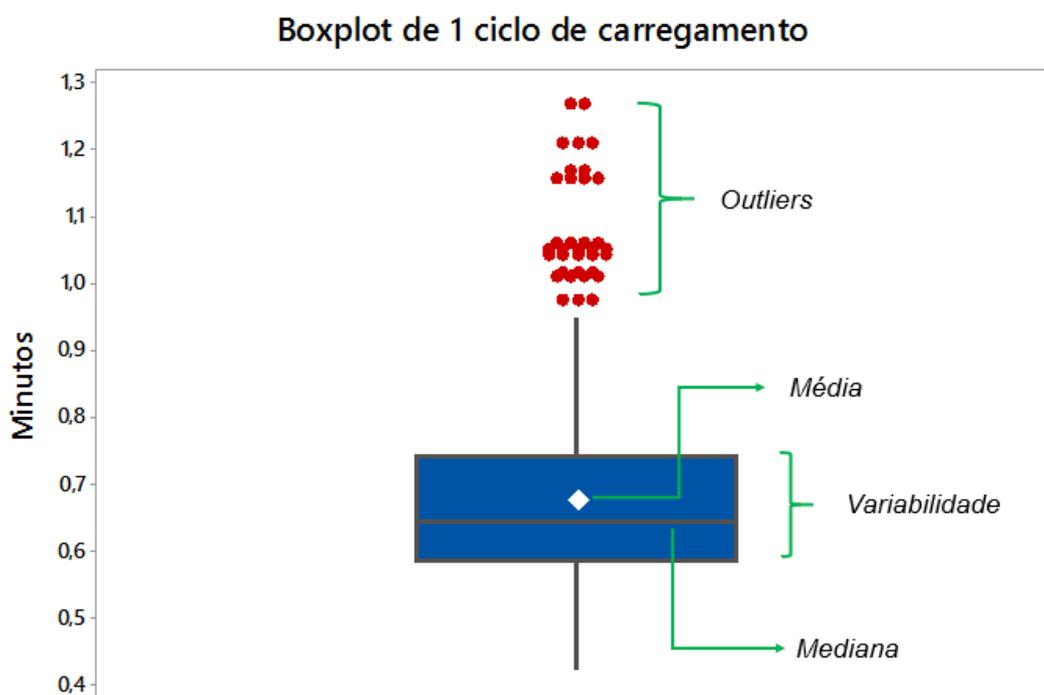


Figura 15 - Exemplo de um *boxplot* construído para tratar os dados.

Posteriormente a análise de *outliers*, foi utilizado o Excel para gerar a margem de erro dos resultados encontrados na pesquisa, através de intervalos de confiança. Um intervalo de confiança, pode-se dizer que é uma maneira de calcular a estimativa de um parâmetro desconhecido, onde a ideia é construir um intervalo para o parâmetro com uma probabilidade de  $1 - \alpha$  (nível de confiança), onde  $\alpha$  é o nível de significância, de que o intervalo contenha o verdadeiro parâmetro.

Por exemplo, quando se fez a análise do tempo de ciclo de um carregamento e determinou-se que o ciclo médio da amostra seria de 40 segundos, definindo um intervalo de confiança de 95%, obteve-se um intervalo 38 a 42 segundos, logo pode-

se ter a confiança que o um ciclo médio de todos os ciclos da operação estariam entre 38 e 42 segundos em 95% das amostras.

Vale ressaltar que o intervalo de confiança é definido em função do número de dados amostral, desvio padrão, nível significância e o teste z ou t. Os testes z ou t são testes estatísticos usados para fazer inferência, capaz de determinar se a média amostral diverge muito da média populacional, sendo que, esses testes pressupõem que a distribuição normal da população é igualmente distribuída ao redor da média. Para tanto, segundo o Teorema Central do Limite, quando uma amostra é grande suficiente, a média amostral segue uma distribuição normal. Para os cálculos de intervalos, foi utilizado o teste z, pois é um teste conveniente quando o tamanho da amostra é grande ( $n > 30$ ).

Frequentemente, quando se quer um intervalo de confiança mais preciso, uma maneira é aumentar o tamanho amostral, pois quanto mais observações houver, mais estreito se torna o intervalo. Outra forma, é a redução da variabilidade, pois quanto menos os dados variarem maior será a precisão da estimativa, já que é o desvio padrão que gera a variabilidade do sistema. Para essa pesquisa, foi adotado um intervalo de confiança de 95%.

Além disso, quando se usa estatísticas para estimar valores, é importante lembrar que sempre o estudo está sujeito a erros de amostragem e, portanto, foi utilizado a margem de erro, para quantificar o erro e indicar a precisão da estimativa. Para um intervalo de confiança, a margem de erro é a distância estimada para cada valor do intervalo de confiança. No exemplo do tempo de um ciclo de carregamento, para um intervalo de confiança de 38 a 42 segundos, a margem de erro é igual a 2.

### **4.3 Produtividade das frentes de lavra e cenário de produção**

Após a análise estatística básica dos dados, foi realizada a simulação da produtividade de cada frente de lavra de acordo com cada equipamento de transporte, além de simular um cenário de produção ideal, considerando os melhores tempos de ciclo medidos em campo.

Para simular a produtividade de cada equipamento das frentes de lavra, foi considerada a capacidade nominal dos equipamentos de transporte, sendo 34 toneladas para o Iveco e 60 toneladas para o Caterpillar 775, de acordo com a Equação 1.

$$Produtividade \left( \frac{t}{h} \right) = \frac{Capacidade\ nominal\ (t)}{\frac{Tempo\ de\ um\ ciclo\ (min)}{60}} \quad \text{Equação 1}$$

Para simular o cenário de produção, através do cálculo da produção pela Equação 2, o tempo de ciclo do cenário normal foi composto pela média dos tempos coletados em campo e, para o cenário ideal, foi considerado o melhor tempo de ciclo, ou seja, do dia em que foram observadas as melhores condições operacionais. Para uma produção mais próxima da operação, foi considerado um turno de 8 horas, uma utilização física de 75% e uma disponibilidade física de 80%.

$$Produção\ (t) = \frac{Capacidade\ nominal\ (t)}{\frac{Tempo\ de\ um\ ciclo\ (min)}{60}} \times Turno \times UF \times DF \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

UF = Utilização do equipamento de transporte (%)

DF = Disponibilidade física do equipamento de transporte (%)

Turno = Horas totais do turno

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vez coletados e analisados, foi possível transformar os dados em informações, de modo a conhecer os principais indicadores de produção.

### 5.1 Tempo de Manobra

A Tabela 1 e a Figura 16 mostram os resultados provenientes do tempo de manobra dos equipamentos de transporte e Iveco e Caterpillar 775.

Tabela 1 – Tempo de manobra dos equipamentos de transporte.

Variáveis	Iveco	775
Média (min)	0,588	0,475
Desvio padrão (min)	0,127	0,104
Número de dados	135	149
Intervalo de confiança (%)	95%	95%
<b>Tempo de manobra (s)</b>	35	29
<b>Margem de erro (s)</b>	1	1

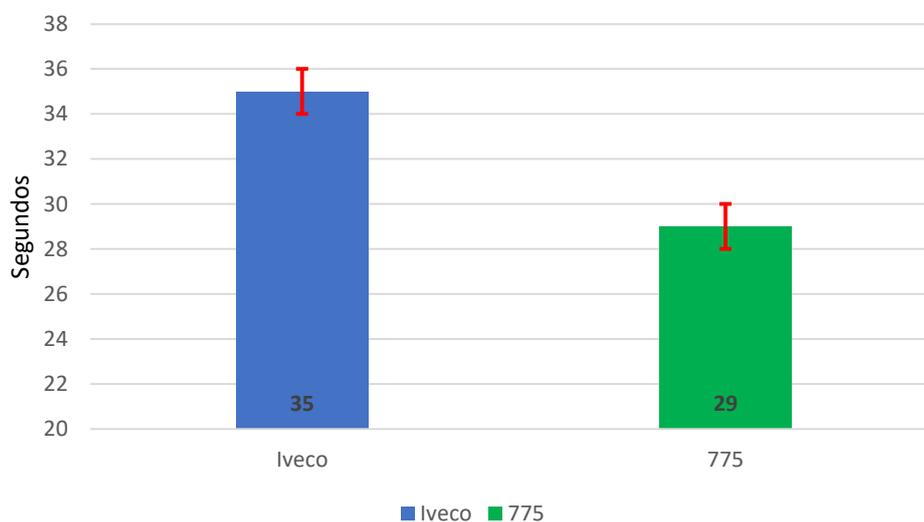


Figura 16 – Tempo de manobra dos equipamentos de transporte.

Com um intervalo de confiança de 95% foi encontrado um tempo de  $35 \pm 1$  segundos para o caminhão rodoviário Iveco e  $29 \pm 1$  segundos para o fora de estrada Caterpillar 775, com baixa margem de erro. Além disso, através da informação apresentada, observou-se uma diferença significativa em relação ao tempo de manobra dos equipamentos.

Através das observações de campo, notou-se que os caminhões rodoviários, por possuir um menor porte, foram destinados a praças que estavam confinadas, o que contribuiu para o aumento do tempo de manobra. Além disso, os motoristas dos caminhões rodoviários possuíam menos experiência do que os motoristas dos caminhões fora de estrada. Outro motivo do maior tempo de manobra dos caminhões rodoviários está relacionado ao maior tempo de troca de marcha e direção dificultada pelas características construtivas do equipamento.

## 5.2 Tempo de Carregamento

A Tabela 2 e a Figura 17 mostram os resultados provenientes do tempo de carregamento dos pares de equipamentos carregadeira - caminhão.

Tabela 2 – Tempo de carregamento dos pares de equipamentos.

Variáveis	980 – Iveco	990 – Iveco	990 – 775
Média (min)	2,943	1,395	2,319
Desvio padrão (min)	0,821	0,430	0,444
Número de dados	61	85	149
Intervalo de confiança (%)	95%	95%	95%
<b>Tempo de carregamento (s)</b>	176	84	139
<b>Margem de erro (s)</b>	12	5	4

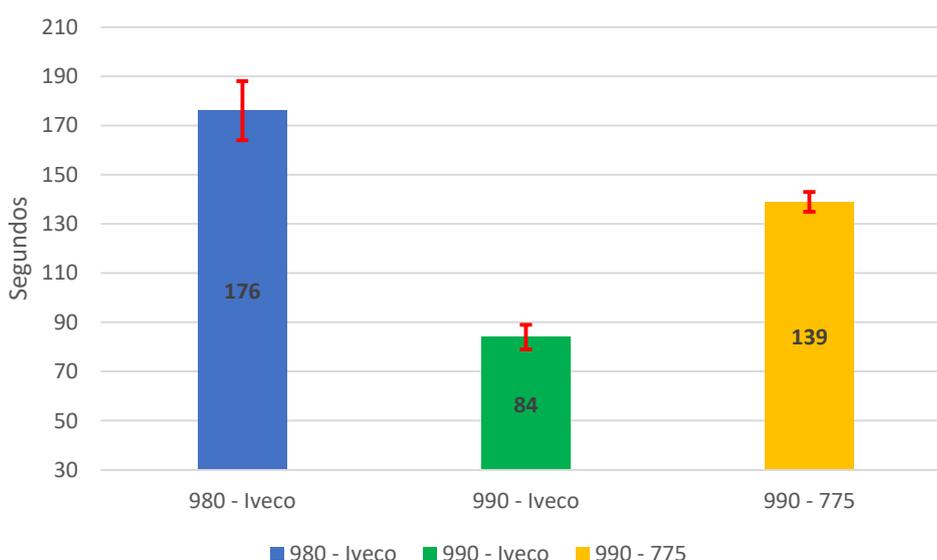


Figura 17 – Tempo de carregamento dos pares de equipamentos.

Em relação ao tempo de carregamento, houve uma maior variabilidade dos dados, ou seja, uma maior margem de erro, em função de alguns fatores, como a qualidade do desmonte, a experiência dos operadores de carregamento e também pela condição de praça.

Foi observado em campo, que a qualidade do desmonte foi o fator que mais afetou o tempo de carregamento, sendo que foi notada a presença de maticos nas frentes de carregamento, o que acarretou na necessidade da separação dos mesmos para não danificar a caçamba do caminhão e evitar a obstrução da alimentação do britador primário.

Outro fato observado foi que os operadores com mais experiência conseguiam movimentar o material com uma maior facilidade do que outros operadores com menor experiência. Também, a condição de praça, ou seja, a largura da praça e o nivelamento do piso, foi um dos fatores que impactavam diretamente no carregamento. Praças com pouca largura de carregamento e pisos irregulares, aumentavam o tempo da operação.

A Figura 17 mostra que o par carregadeira-caminhão 980 – Iveco apresentou o maior tempo de carregamento, por volta de 3 minutos, tanto em função dos motivos já citados, quanto em relação a capacidade nominal dos equipamentos. Logo, para uma melhor análise, os tempos foram avaliados com seus respectivos números de ciclos, conforme apresentado na Figura 18.

O par 990 – 775 é mais utilizado na operação, pois dos 295 ciclos observados, 149 são deste par, ou seja, mais de 50%, com um tempo médio de 2 minutos e  $19 \pm 4$  segundos. Segundo Peroni (2015), o número de ciclos ideal estaria entre 3 a 6 ciclos, e na Figura 18-a) podemos ver que em 100% do carregamento está entre esse intervalo (4 a 5 ciclos) e, além disso, segundo o manual de equipamentos da Caterpillar, o número de ciclos também encontra-se dentro do recomendado.

O par 990 – Iveco é o segundo par mais utilizado na operação, representando um tempo médio de 1 minuto e  $24 \pm 5$  segundos, menor que o par 990 – 775, devido ao fator caçamba do Iveco ser aproximadamente a metade do fora de estrada 775, sendo

34 e 60 toneladas, respectivamente. Se tratando de números de ciclos, esse tipo de carregamento é considerado o de maior risco de danos pessoais e materiais, pois como trata-se de no máximo 3 ciclos para carregar o caminhão, a massa por ciclo é elevada e, se por ventura houver desvio operacional no içamento da carga, poderia resultar em um acidente com lesão humana e danos estruturais ao caminhão.

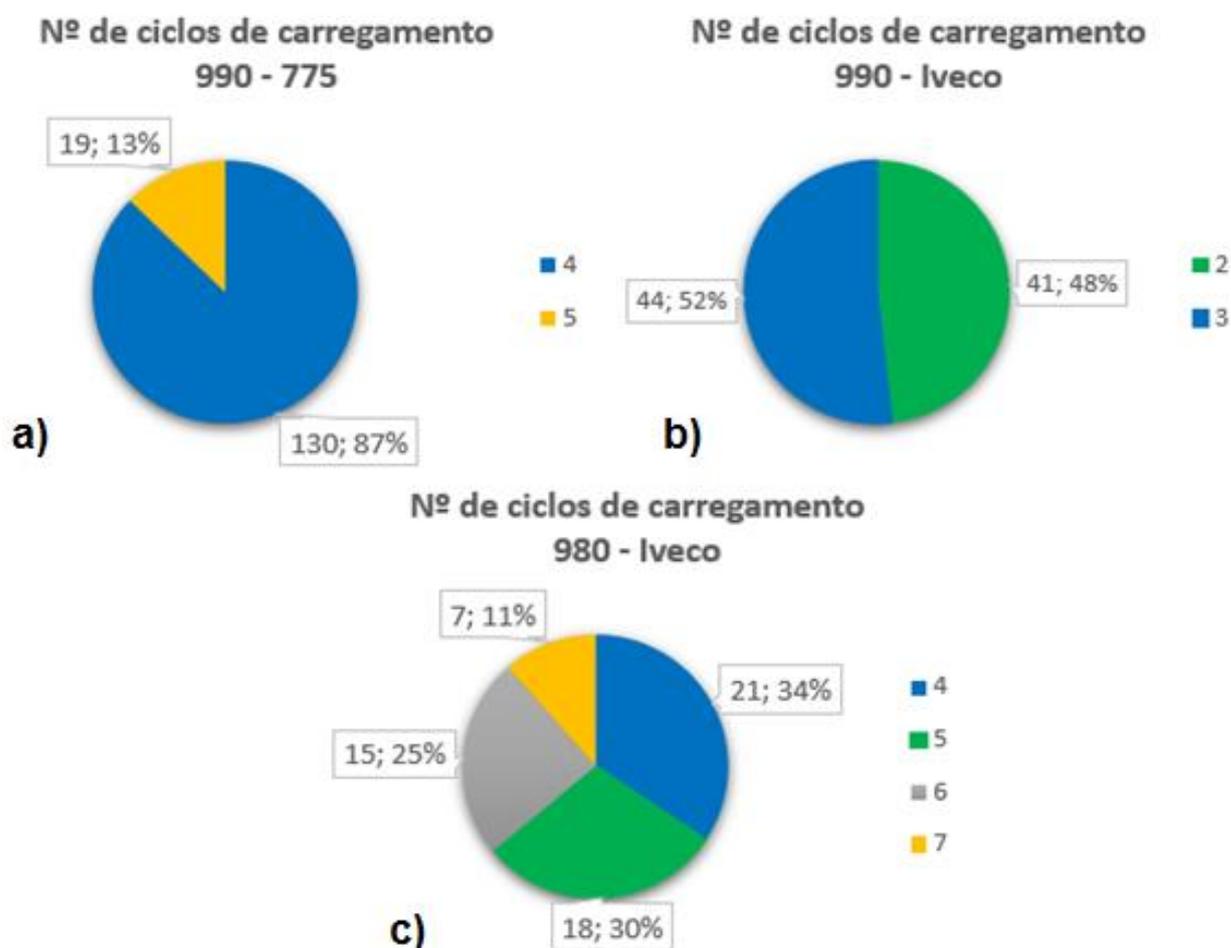


Figura 18 – Números de ciclos de carregamento a) 990 – 775; b) 990 – Iveco; c) 980 – Iveco.

Em relação ao par 980 – Iveco, pode-se dizer que é o par de carregamento mais diversificado em número de ciclos, de 4 a 7, e considerado o segundo par mais compatível da operação depois do 990 – 775, com um tempo médio de 2 minutos e  $56 \pm 12$  segundos. Como o par 980 – Iveco era destinado a lugares mais confinados e, na maioria das vezes, a locais desnivelados, e com presença de maticos, apresentou maior tempo de carregamento se comparado ao par 990 – 775.

De modo a avaliar o carregamento como um todo, foi criado um *boxplot* com todos os ciclos dos pares utilizados na operação, conforme mostra-se na Figura 19. Segundo Coutinho (2017), um tempo de ciclo ideal para cada carregamento estaria dentro de um intervalo de 28 a 42 segundos, e analisando a Figura 19 com mais de 1142 números de um ciclo de carregamento, observa-se que o tempo de ciclo médio ficou próximo dos 41 segundos, ou seja, o tempo de carregamento está no limite para ser considerado eficiente. Observa-se ainda no *boxplot* que a mediana é bem próxima da média aritmética, de modo que os valores extremos não influenciaram muito na média dos tempos. Além disso, os *outliers* no gráfico representam os valores atípicos encontrados em campo, devido aos fatores que influenciam no carregamento conforme citado anteriormente.

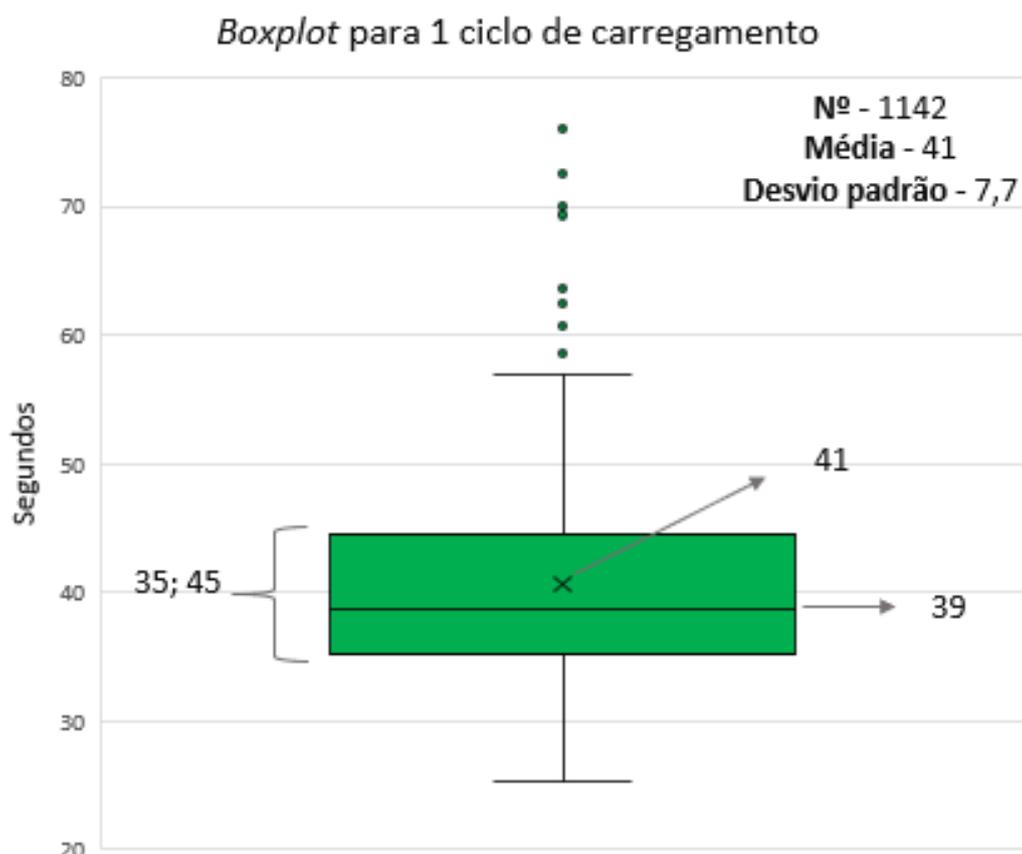


Figura 19 - Tempo de um ciclo de carregamento

### 5.3 Tempo de Basculamento

A Tabela 3 e a Figura 20 mostram os resultados provenientes do tempo de basculamento dos equipamentos de transporte.

Tabela 3 - Tempo de basculamento dos equipamentos de transporte.

Variáveis	Iveco	775
Média (min)	1,585	0,950
Desvio padrão (min)	0,418	0,133
Número de dados	131	137
Intervalo de confiança (%)	95%	95%
<b>Tempo de manobra (s)</b>	<b>95</b>	<b>57</b>
<b>Margem de erro (s)</b>	<b>5</b>	<b>1</b>

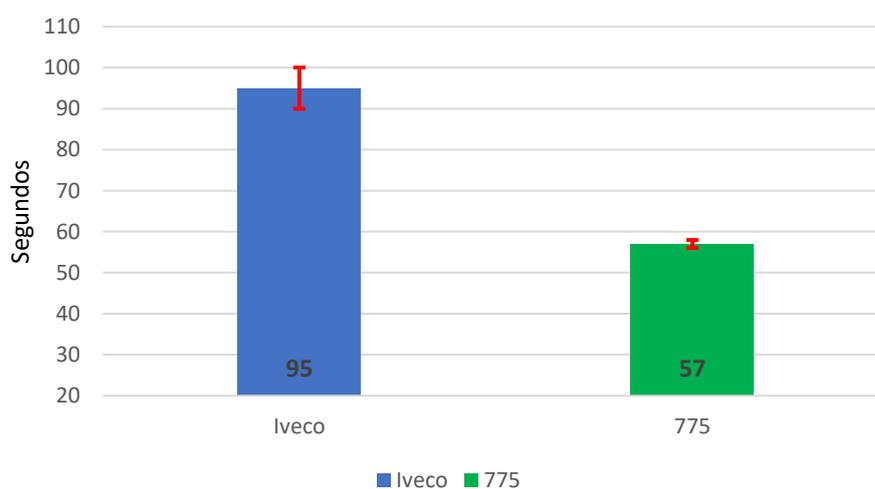


Figura 20 - Tempo de Basculamento

Em relação ao tempo de basculamento, foi tomado como premissa no planejamento do trabalho que a manobra de basculamento iria ser contabilizada junto com o tempo de basculamento, pois a mineração possuía duas linhas de britagem com três batentes em cada. Logo não gerava filas de basculamento, e se por ventura houvesse atraso no sinal da britagem, era ordenado que os caminhões realizassem o basculamento ao lado dos britadores.

Em um primeiro momento foi analisado as duas linhas de forma distinta, ou seja, tempo de basculamento linha 1 e tempo de basculamento linha 2, porém, no decorrer da análise dos dados, foi observado que não havia diferença significativa de tempos

e, portanto, o processo foi considerado como um todo. Na Figura 20 pode-se ver que o tempo de basculamento do caminhão rodoviário Iveco, de  $95 \pm 5$  segundos, é maior que o tempo do fora de estrada 775, com  $57 \pm 1$  segundos. Este resultado se deve ao fato de que o Iveco era um caminhão de maior dificuldade na troca de marcha e no acionamento da báscula. Além disso, o caminhão Iveco as vezes apresentava problemas de básculo, fato justificado pelo o mesmo ter sido adaptado para as atividades de minerao.

Em análise de tempo de basculamento, no decorrer das 62 horas de operao, foi observado que era gerado uma grande quantidade de atrasos para o basculamento, ou seja, o caminhão manobrava para bascular, porém o sinal da britagem permanecia fechado. Por isso, foi realizado um questionário com os operadores de painel da britagem para saber quais os fatores que mais influenciavam esse atraso. Os resultados estão apresentados no diagrama de causa e efeito, conforme ilustrado na Figura 21. Observa-se que, entre as causas levantadas, grande parte está relacionada às paradas operacionais da britagem ocasionadas pelas características do minério, tais como material pouco fragmentado, argiloso, etc.

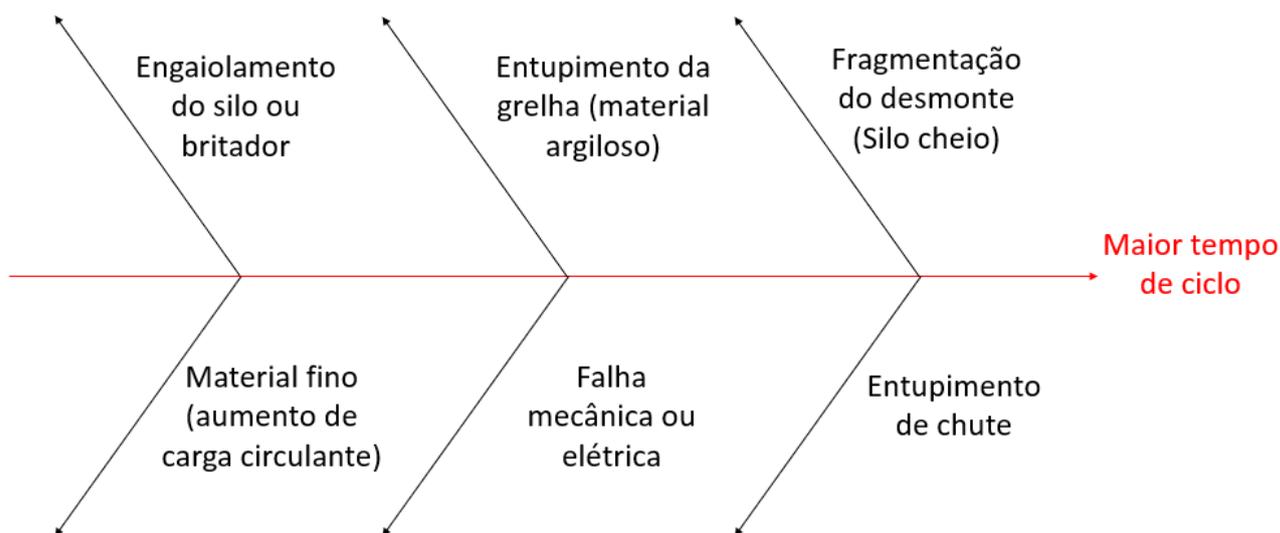


Figura 21 - Diagrama de causa e efeito de atrasos no basculamento

Foi medido um atraso em cerca de 3,5 horas em 8,7 horas de basculamento totais, representando um atraso de 6% das 62 horas da operao avaliada no período.

#### 5.4 Velocidade média das frentes de lavra

A Figura 22 e a Figura 23 mostram um comparativo das velocidades médias dos equipamentos de transporte Caterpillar 775 rodoviário Iveco nas frentes de lavra.

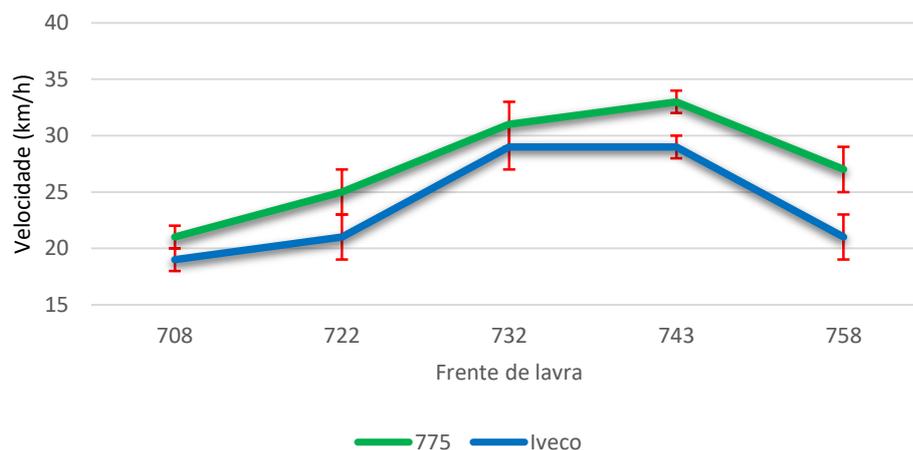


Figura 22 -Velocidade de deslocamento cheio por frente de lavra

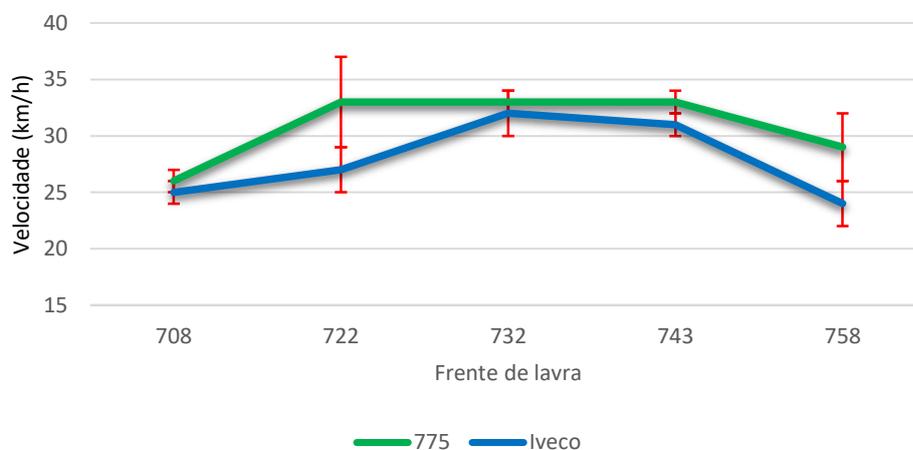


Figura 23 – Velocidades do deslocamento vazio por frente de lavra

Observa-se em geral que os caminhões fora de estrada 775 possuem velocidades médias superiores aos rodoviários Iveco. Também se observa, na Figura 22, que a velocidade média nas frentes 708, 722 e 758 apresenta-se abaixo das frentes 732 e 743. Isto ocorre porque as frentes 708 e 722 encontram-se numa elevação inferior à do britador, ou seja, os caminhões percorrem o trecho carregado em aclive para se deslocarem até a britagem primária. Já na frente de lavra 758 o caminhão descia carregado, porém percorria uma maior distância em um trajeto que a estrada se encontrava bastante irregular e com via de mão única em alguns pontos.

## 5.5 Produtividade unitária dos equipamentos

Com base nas DMT, obtidas pelo AutoCAD, foi possível simular a produtividade dos equipamentos de transporte, considerando a capacidade nominal dos equipamentos. A Tabela 4 apresenta esses resultados, onde se observa os tempos de ciclos médios de cada frente de lavra coletados em campo e suas respectivas produtividades, calculada através da Equação 1 apresentada na metodologia. Já na Figura 24 é possível visualizar melhor como as distâncias médias de transportes, afetam na produtividade do equipamento.

Tabela 4 - Tempos de ciclos totais e produtividade por frente de lavra

Frente de lavra	DMT (km)	Tempo de ciclo (min)		Produtividade (t/h)	
		Iveco	775	Iveco	775
708	1,22	11,15	10,18	183	354
722	0,91	8,40	7,30	243	493
732	1,10	10,33	7,91	197	455
743	1,20	9,45	8,36	216	431
758	1,21	13,55	9,30	151	387

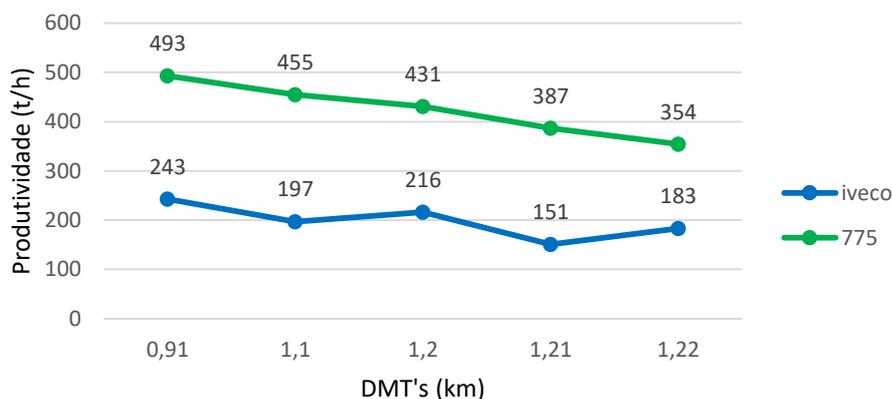


Figura 24 - Produtividade por DMT

Na Tabela 4 e na Figura 24, observa-se que os tempos de ciclos médios possuem um mínimo de 7,30 minutos e um máximo de 13,55 minutos, onde também é possível analisar como o aumento das distâncias médias de transporte influenciam no tempo de ciclo e, conseqüentemente, na produtividade. O caminhão Iveco apresentou um intervalo de tempo de 8,40 a 13,55 minutos, enquanto o caminhão Caterpillar 775 um

intervalo de tempo de 7,30 a 10,18 minutos. Em análise de todos os elementos de ciclos, como o tempo de manobra, carregamento, deslocamento e basculamento, fica notório como o 775 se sobressai em relação a produtividade unitária de equipamento, ou seja, em todas as frentes de lavra o caminhão Iveco tem um maior tempo por elementos de ciclo e, conseqüentemente, um maior tempo total.

Vale ressaltar ainda, que a principal diferença de produtividade por equipamentos é em função do fator caçamba (capacidade nominal), sendo 60 toneladas para o caminhão fora de estrada Caterpillar 775 e de 34 toneladas para o caminhão rodoviário Iveco.

Em números, comparando na Figura 24 a produtividade da menor distância de transporte e o maior equipamento de transporte com a maior distância e o menor equipamento de transporte (Caterpillar 775 na frente 732 e o Iveco na frente 708), pode-se observar, respectivamente, uma produtividade de 493 e 183 toneladas/horas, resultando em uma diferença de produtividade de 2,7 vezes a mais que a outra, cerca de 310 t/h.

## 5.6 Tempo de Fila

Os próximos gráficos, representados pelas Figura 25 e Figura 26, diz respeito ao tempo de fila analisado na operação.

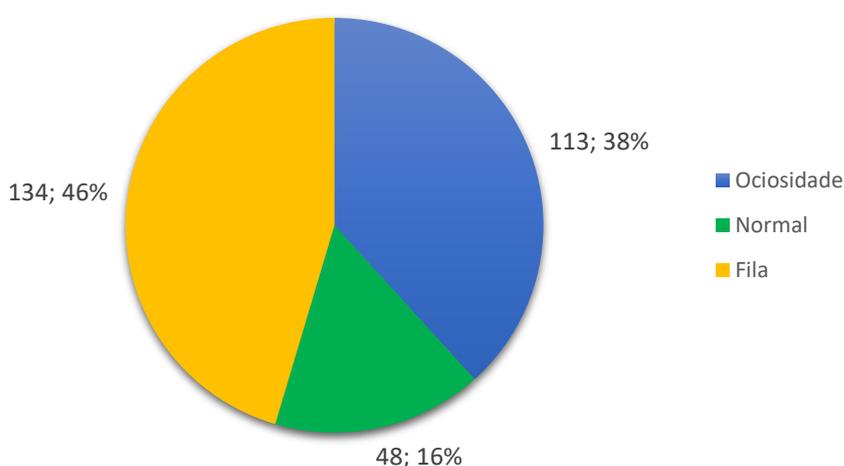


Figura 25 – Ciclos por condição de carregamento.

Em relação aos tempos de fila, conforme mencionado anteriormente, não houve fila significativa na britagem e, por isso, foi realizada uma análise apenas no tempo de fila de carregamento. A Figura 25 mostra como os 295 ciclos se distribuíram em relação a condição de carregamento. Para isso, foi tomado como premissa que um tempo de fila para um carregamento de até 1 minuto de espera foi considerado como normal, ou seja, valores superiores a isso eram considerados como fila. Em relação a ociosidade dos equipamentos de carregamento, não foi contabilizado o tempo que eles ficaram ociosos, e apenas o número de eventos que ocorreu, devido a pesquisa ter sido realizada dentro dos equipamentos de transporte.

Em análise do gráfico da Figura 25, observa-se que apenas 16% dos ciclos estavam em condições normais, ou seja, não havia equipamentos ociosos e não havia tempo de espera para carregamento. Em relação a quantidade de tempo de fila, foi analisado, que no total de 62 horas da pesquisa, 8 horas se referiam ao tempo de fila, representando 13% do total de horas da operação. Porém, em termos percentuais, o número de ciclos com fila representa 46% do total.

A Figura 26 apresenta como foi distribuído o tempo de fila em relação ao tempo de operação em cada turma, expresso em percentual. Nota-se que o maior percentual de tempo de fila encontra-se na equipe B, aproximadamente 20%, ou seja, presume-se que haja uma falha na alocação de frota das frentes de lavras na referida equipe.

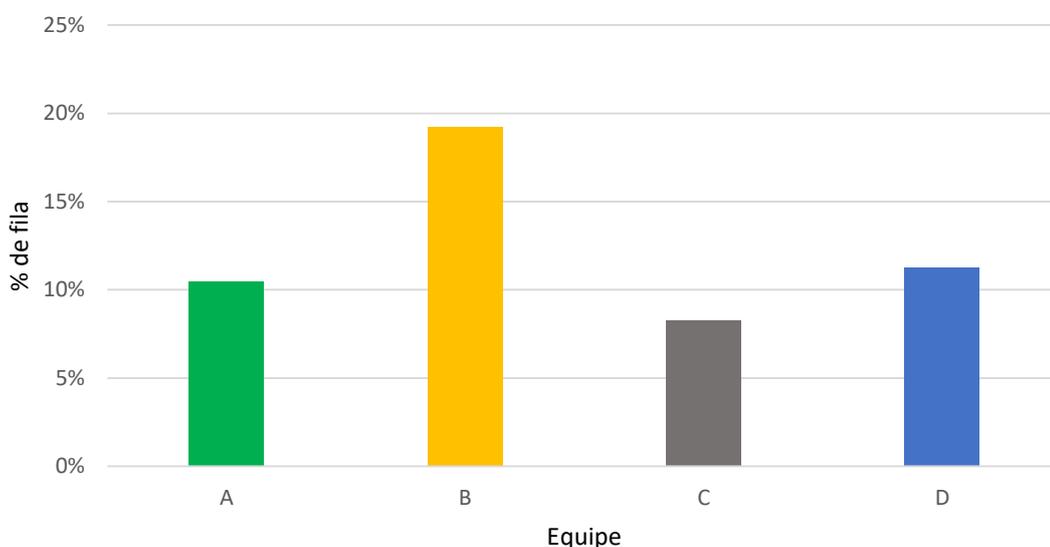


Figura 26 – Porcentagem de Tempo de fila por horas de operação de cada equipe

## 5.7 Cenário de produtividade

De modo a analisar melhor como algumas variáveis de operação influenciavam na produtividade, foi criado um cenário de produção para o nível 708, a frente cujo minério é lavrado em maior quantidade, quando o carregamento e transporte era realizado pelo par 990 – 775, o par mais utilizado na operação, tomando algumas premissas observadas em campo e também pelo questionário realizado diariamente com os operadores.

- Cenário normal: onde foi considerado todos os tempos coletados em ruins ou boas condições de operação.
- Cenário ideal: onde havia operadores com experiência na mineração, uma boa fragmentação do desmote e de acesso de praça e largura de carregamento, uma alocação acurada (não tinha fila), além de ter vias de tráfego em boas condições, devido a motoniveladora ter trabalhado no local recentemente.

A Tabela 5 ilustra os valores de tempos de elementares médios e seus respectivos cenários de produção, que foram calculados através da Equação 2 apresentada na metodologia para a simulação de produção, sendo tomado como premissa uma disponibilidade física de 80% e 75% de utilização física, além de um fator caçamba de 60 toneladas para o equipamento de transporte. Na Tabela 5 também é apresentada a diferença, em %, da condição ideal em relação à normal.

Tabela 5 - Cenário de produção

<b>Cenários</b>	<b>Normal (min)</b>	<b>Ideal (min)</b>	<b>Diferença (%)</b>
<b>Tempo de fila</b>	1,15	0	- 100,0
<b>Manobra</b>	0,50	0,37	- 26,0
<b>Carregamento</b>	2,30	2,03	- 11,7
<b>Deslocamento cheio</b>	3,65	3,45	- 5,5
<b>Manobra e basculado</b>	1,00	0,86	- 14,0
<b>Deslocamento vazio</b>	2,92	2,45	- 16,0
<b>Tempo de ciclo total</b>	<b>11,52</b>	<b>9,16</b>	<b>- 20,5</b>
<b>Produtividade (t/h)</b>	<b>312,5</b>	<b>393</b>	<b>25,8</b>
<b>Produção por turno (t)</b>	<b>1.500</b>	<b>1.886</b>	<b>25,7</b>

Na Tabela 5 é possível visualizar os elementos de tempos de ciclos nas condições apresentadas e suas respectivas diferenças, observa-se que o tempo de fila e as manobras são os tempos que mais impactam no tempo de ciclo total, influenciando diretamente na produtividade.

Em síntese, na simulação apresentada, o resultado mostra como uma operação em boas condições pode trazer ganhos significativos na produção, através da redução do tempo de ciclo. Em específico para essa frente, uma operação em boas condições de carregamento e acesso, uma boa fragmentação entre outros fatores, pode resultar em um aumento de quase 26% na produtividade unitária dos equipamentos.

## 6 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa estudou-se os tempos de ciclo no carregamento e transporte de uma mina a céu aberto e como as condições operacionais impactavam diretamente na operação. Pode-se concluir que os tempos médios de ciclos das frentes de lavra foram bastante variados, onde o caminhão Caterpillar 775 apresentou menores tempos de ciclos das principais frentes de lavra, obtendo um intervalo de tempo de 7,30 a 10,18 minutos, enquanto o caminhão Iveco, obteve um intervalo de tempo de 8,40 a 13,55 minutos.

Ainda neste trabalho foi possível mensurar a porcentagem do tempo de fila da operação, onde em 62 horas, 8 horas foram destinados a tempos de fila, representando 13 % do tempo total. Outro tempo improdutivo foi em relação a atraso no basculamento na britagem, representando cerca de 6% do tempo. Dessa forma, quase 20% do tempo da operação foram tempos perdidos devido a falhas operacionais.

Além disso, concluiu-se que alguns fatores impactaram diretamente na operação como: as distâncias médias de transporte, a qualidade do grau de fragmentação desmonte, as condições de praças e acessos, a experiência dos operadores, a alocação da frota, entre outros. Dentro disso, concluiu-se em números no cenário de produtividade, como uma boa condição operacional influencia diretamente no aumento da produção, resultando em um aumento de cerca de 26% na produtividade unitária do equipamento.

Portanto, entende-se que é de suma importância que sejam realizados treinamentos periódicos com os colaboradores para otimizar o planejamento de alocação de frota e reduzir falhas operacionais decorrentes da falta de capacitação técnica.

Além disso, uma maior supervisão no carregamento contribuiria para diminuir as horas improdutivas. Adicionalmente, trabalhos com foco na qualidade do desmonte e uma maior atenção as condições de acessos e de praça contribuiria com a redução do tempo de ciclo. E como uma última recomendação e não a menos importante, avaliar

o investimento em um sistema de despacho, pois assim seria possível um controle mais efetivo, com o desenvolvendo de trabalhos com foco em melhorias operacionais.

## 7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar o *software* Arena para fazer simulação de logística e dimensionamento de frota.
- Fazer uma análise estatística avançada das variáveis que impactam positivamente e negativamente na produtividade nas etapas de carregamento e transporte.

## REFERÊNCIAS

BORGES, T. C. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração.** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto. 2013. 116p.

BOTELHO, A. H. **Influência da operação de desmonte de rochas no carregamento de material fragmentado.** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014. 107p.

BRASIL. **Departamento Nacional de Produção Mineral.** Portaria 237. Normas Reguladoras de Mineração. Distrito Federal: DNPM, 2001. 94 p.

CATERPILLAR. **Manual de Produção.** 36ª edição, Caterpillar inc. USA, 2004. 32p.

CORRÊA, M.M.; CANAAN SILVEIRA, L.G.; LIMA, H.M. **The loss of productivity and costs associated with the premature scrapping of mining tires.** World Mining Congress. Rio de Janeiro. 2016.

COUTO, R. T. Da S. **Lavras a céu aberto e equipamentos principais.** (Dissertação de doutoramento apresentada à Faculdade de Engenharia do Porto). Departamento de Engenharia de Minas. 1990. 320p.

COUTINHO, H. L. **Melhoria continua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto.** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto. 2017. 94p.

CSN MINERAÇÃO. **Padrão de acesso mina; Treinamento operacional carregadeira.** Revisão: Dênis Moura da Silva. Arcos - MG. 2020.

CURI, Adilson. **Lavra de Minas.** Oficina de textos. 461p.

DE CARLI, C. **Análise de projetos limite: lavra a céu aberto x lavra subterrânea.** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2013. 123p.

JUNIOR, W. S. F. **Análise do desempenho dos operadores de equipamentos de mina e simulação de cenários futuros de lavra – Estudo de caso (mina cada de pedra – Congonhas/MG).** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto. 2014. 124p.

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.** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto. 2010. 94p.

PERONI, R. **Manual de operação de lavra e dimensionamento de equipamentos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.

PINTO, E. B. **Despacho de caminhões em mineração usando logica nebulosa, visando ao atendimento simultâneo de políticas excludentes.** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Minas Gerais. 2007. 120p.

RACIA, I. M. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração.** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016. 108p.

RODRIGUES, L. F. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto.** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Minas Gerais. 2006. 103p.

REIS, M. S. **Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra a céu aberto de minério de ferro dentro do Quadrilátero Ferrífero.** (Dissertação de

Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil. 2014. 175p.

SANTOS, D. S. O. **Análise comparativa do método de alocação de caminhões em uma mina de ouro a céu aberto.** (Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia). 2018. 83p.

SOUZA, T.; CABRAL, I. **Simulador de mina subterrânea a eventos discretos para apoio à tomada de decisão.** Revista ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2 p. São Paulo, 2016.