



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



PATRICK VÍCTOR HELENO E SILVA

ALAVANCAGEM DA PRODUTIVIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE UMA MINA A  
CÉU ABERTO – ESTUDO DE CASO

OURO PRETO  
2021

PATRICK VÍCTOR HELENO E SILVA

ALAVANCAGEM DA PRODUTIVIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE UMA MINA A  
CÉU ABERTO – ESTUDO DE CASO

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

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Miranda

Coorientador: Eng. Gustavo de Oliveira Mota

OURO PRETO

2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Patrick Victor Heleno e.  
Alavancagem da produtividade dos equipamentos de uma mina a céu aberto [manuscrito]: estudo de caso. / Patrick Victor Heleno e Silva. - 2022.  
84 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Miranda.

Coorientador: Gustavo de Oliveira Mota.

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

1. Mineração a céu aberto. 2. Minas e recursos minerais - Carregamento e transporte. 3. Desempenho - Indicadores. 4. Calcário - Minas e mineração. I. Miranda, José Fernando. II. Mota, Gustavo de Oliveira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.68

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



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos cinco dias do mês de janeiro de 2022, às 10h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Patrick Víctor Heleno e Silva**, matrícula 14.1.1018, intitulado: **“ALAVANÇAGEM DA PRODUTIVIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE UMA MINA A CÉU ABERTO – ESTUDO DE CASO”**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. José Fernando Miranda, pelo Eng.º de Minas Gustavo de Oliveira Mota (Coorientador), pelo Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, e o Prof. Dr. José Margarida da Silva. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, a presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, segundo o Prof. Dr. José Margarida da Silva, terceiro, o Eng.º de Minas Gustavo de Oliveira Mota e, em último, o Prof. Dr. José Fernando Miranda. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 9,5 (nove vírgula cinco). O discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP, no prazo máximo de 15 (quinze) dias, uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão.

Ouro Preto, 05 de janeiro de 2022

Presidente: Prof. Dr. José Fernando Miranda

Membro: Eng.º de Minas Gustavo de Oliveira Mota (Coorientador)

Membro: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Membro: Prof. Dr. José Margarida da Silva

Discente: Patrick Víctor Heleno e Silva

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por guiar meus passos e me abençoar grandiosamente.

À minha família, por todo carinho, zelo e apoio durante a graduação.

À Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino público de qualidade.

Aos professores da Escola de Minas, pela excelência no ensino.

À República Calamidade Pública, por ser meu segundo lar e família e à Dona Maria, por ser a segunda mãe de todos nós moradores.

A todos os meus amigos e colegas de trabalho que contribuíram para conclusão deste trabalho.

## RESUMO

A mineração objetiva agregar valor a minérios através de processos industriais, buscando a maximização do lucro sobre recursos exauríveis não renováveis. Nas últimas décadas, a redução dos custos de produção foi alcançada pelo implemento no porte dos equipamentos limitando-se as tecnologias disponíveis. Atualmente, as oportunidades de redução de custos estão focadas na otimização das atividades unitárias dos empreendimentos mineiros através da maximização de indicadores de performance. No presente trabalho realizou-se um estudo de caso sobre uma mineração de pequeno porte no estado do Tocantins, buscando entender e tratar as causas da baixa produtividade dos equipamentos de carregamento, transporte e britagem, utilizando as ferramentas de gestão e qualidade. Durante o estudo, buscou-se responder algumas perguntas referentes ao dimensionamento de frota, tais como: o dimensionamento foi adequado?, qual a produtividade das retroescavadeiras substitutas?, quais as razões da divergência entre o planejado e executado?, quais as tratativas tomadas e qual o impacto que elas geraram na produção?. As respostas foram elucidadas por meio de cálculos embasados na literatura, amostragens em campo e análise dos processos envolvidos. Dessa forma, foi possível realizar análises sobre os diferentes *layouts* de operação, buscando discutir a influência da variação do porte dos equipamentos de carregamento e transporte na lavra de calcário.

Palavras-chave: dimensionamento, frota, otimização, indicadores de performance, mina de calcário, mineração de pequeno porte.

## **ABSTRACT**

Mining aims to add value to ores through industrial processes, seeking to maximize profit over non-renewable exhaustible resources. In recent decades, the reduction in production costs was achieved by the implement in the size of the equipment, limiting the available technologies. Currently, cost reduction opportunities are focused on optimizing the unitary activities of mining projects by maximizing performance indicators. In the present work, a case study was carried out on a small-scale mining in the state of Tocantins, seeking to understand and treat the causes of low productivity in loading, transport and crushing equipment, using management and quality tools. During the study, we sought to answer some questions regarding fleet sizing, such as: was the sizing adequate? What is the productivity of replacement backhoes? What are the reasons for the divergence between what was planned and executed? what impact did they generate on production?. The answers were elucidated through calculations based on the literature, field sampling and analysis of the processes involved. Thus, it was possible to carry out analyzes on the different operation layouts, seeking to discuss the influence of the variation in the size of loading and transport equipment in limestone mining.

Keywords: dimensioning, fleet, optimization, performance indicators, limestone mine, small scale mining.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composição dos custos operacionais de transporte. ....	12
Figura 2: Atividade de decapeamento. ....	16
Figura 3: Progressão da produtividade das perfuratrizes.....	16
Figura 4: Principais componentes de um sistema de perfuração rotativo. ....	17
Figura 5: Componentes básicos do Martelo de Superfície e Martelo de Fundo de Furo . ....	18
Figura 6: Desmonte de rocha por explosivos. ....	19
Figura 7: Influência do diâmetro e nº de furos na fragmentação de rocha.....	20
Figura 8: Fluxograma do circuito fechado entre as atividades de transporte e carregame.....	23
Figura 9: Representação da capacidade de enchimento rasa e coroada .....	24
Figura 10: Modelo 3D de pá Carregadeira KOMATSU WA 900.....	25
Figura 11: Escavadeira Drag-line CAT 8200 com acionamento a cabo. ....	26
Figura 12: Escavadeira Shovel KOMATSU PC 2000 de acionamento hidráulico .....	27
Figura 13: Largura da via em função da largura dos caminhões. ....	28
Figura 14: BELAZ 75710, caminhão com capacidade de 450 toneladas.....	29
Figura 15: Correia transportadora em operação.. ....	30
Figura 16: Plano de lavra e layout de correias, em azul, executado na SAMARCO .....	30
Figura 17: Centralização de carga na báscula dos caminhões.....	33
Figura 18: Carta de seleção de porte de equipamento .....	34
Figura 19: Compartimentação tectônica do Sistema Orogênico Tocantins. ....	43
Figura 20: Fluxograma de operação .....	44
Figura 21: Perfuratriz SANDVIK DX 680.....	46
Figura 22: Carreta de Perfuração PW PWH-5000.....	46
Figura 23: Retroescavadeira Hidráulica LIEBHERR R 954 SME.....	47
Figura 24: Retroescavadeira Hidráulica KOMATSU 350 .....	47
Figura 25: Caminhão Basculante VOLVO FM 8x4R .....	48
Figura 26: Caminhão Basculante MERCEDES AXOR 3340 .....	48
Figura 27: Diagrama de Ishikawa elaborando durante estudo .....	51
Figura 28: Exemplo de relatório de Produtividade exportado via Power BI .....	52
Figura 29: Alcance da escavadeira LIEBHERR R 954 C SME.....	53
Figura 30: Alcance de trabalho da Escavadeira KOMATSU LC 210-10. ....	53
Figura 31: Avaliação da compatibilidade entre escavadeiras e caminhões.....	61
Figura 32: Carregamento transversal. ....	63
Figura 33: Dimensões da caçamba da retroescavadeira LIEBEHRR R 954 SME.....	63
Figura 34: Dimensões da caçamba dos caminhões de pequeno porte. ....	64
Figura 35: Representação das formas de carregamento. ....	64
Figura 36: Trincas, soldas e avarias na caçamba do caminhão VW. 31-320. ....	65
Figura 37: Fotos com esfera de referência para análise granulométrica. (A) Antes da revisão do plano de fogo. (B) Após reelaboração do plano de fogo. ....	67
Figura 38: Planos médios de descontinuidade da face oeste da cava.....	68
Figura 39: Retroescavadeira Volvo 380D locada, com caçamba de 3,0 m <sup>3</sup> .....	68
Figura 40: Melhoria implementada no fim de curso do cilindro de acionamento da tampa da báscula. ....	70



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Trecho do Pareto de parada do britador primário. ....	50
Gráfico 2: Pareto das falhas dos veículos de transporte.. ....	54
Gráfico 3: Distribuição das principais falhas dos equipamentos de transporte. ....	66
Gráfico 4: Distribuição granulométrica referente à figura (B).. ....	67
Gráfico 5: Indicadores de performance do britador primário. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produtividade mensal e número de equipamentos necessários por atividade. ....	45
Tabela 2: Equipamentos de perfuração. ....	46
Tabela 3: Equipamentos de carregamento, próprios e terceiros. ....	47
Tabela 4: Equipamentos de transporte próprios e terceiros. ....	48
Tabela 5: Tempo de ciclo das escavadeiras por porte dos caminhões. ....	55
Tabela 6: Tempo de ciclo médio dos caminhões por porte da escavadeira. ....	56
Tabela 7: Tempos médios de cada etapa do ciclo de carregamento das escavadeiras LIEBHERR. ....	57
Tabela 8: Produtividade teórica proposta dos equipamentos de carregamento por equipamento. ....	58
Tabela 9: Produtividade teórica proposta dos equipamentos de transporte por tamanho da caçamba. ....	59
Tabela 10: Produtividade das retroescavadeiras em função das horas programadas. ....	59
Tabela 11: Produtividade dos caminhões em função das horas programadas. ....	60
Tabela 12: Número de ciclos necessários para o carregamento de um caminhão. ....	61
Tabela 13: Programação semanal da manutenção de máquinas móveis destacando as inspeções. ....	70
Tabela 14: Comparação da DF de carregamento e transporte. ....	71
Tabela 15: Alavancagem dos KPI's do britador primário. Valores de produtividade em função da capacidade nominal do britador. ....	72

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Aprox. – Aproximadamente

$d_e$  – diâmetro do explosivo/furo

DF – Disponibilidade Física

DMT – Distância Média de Transporte

DTH – Down the Hole

Equip. – Equipamento

Quant. – Quantidade

m – Metro

$m^3$  - Metro cúbico

min – Minuto

Máx – Máximo

Nr 22 – Norma Regulamentadora 22.

PIAE – plano integrado de aproveitamento econômico

PRAD – plano de recuperação de áreas degradadas.

s – Segundo

vol – Volume

$\rho_e$  – densidade do explosivo

$\rho_r$  – densidade da rocha

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....	12
1.2. RELEVÂNCIA DO TRABALHO .....	13
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1. OBJETIVO GERAL .....	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1. OPERAÇÕES MINEIRAS .....	15
3.1.1. Decapeamento .....	15
3.1.2. Perfuração .....	16
3.1.2.1. Perfuração rotativa .....	17
3.1.2.2. Perfuração rotopercussiva .....	18
3.1.3. Desmonte .....	18
3.1.4. Carregamento .....	23
3.1.4.1. Pá carregadeira .....	25
3.1.4.2. Escavadeira .....	26
3.1.5. Transporte .....	27
3.1.4.3. Transporte por caminhões .....	27
3.1.4.4. Transporte por correias transportadoras .....	29
3.2. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO EQUIPAMENTOS .....	31
3.3. COMPATIBILIDADE ENTRE EQUIPAMENTOS .....	32
3.4. PRODUTIVIDADE DE EQUIPAMENTOS DE CARGA E TRANSPORTE .....	35
3.5. INDICADORES DE PERFORMANCE (K.P.I.) .....	35
3.5.1. Disponibilidade Física .....	36
3.5.2. Fator de utilização do equipamento .....	36
3.5.3. Fator de Operação conjugada .....	37
3.5.4. Eficiência .....	38
3.6. TEMPO DE CICLO .....	39
3.7. SISTEMAS DE DESPACHO .....	40
3.8. ALOCAÇÃO DE CAMINHÕES .....	41
3.9. CARACTERÍSTICAS DA FROTA .....	41
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>43</b>
4.1. ESTUDO DE CASO .....	43
4.1.1. Parâmetros de operação .....	44
4.1.2. Situação problema .....	49

4.1.3.	Relatos em campo e levantamento de hipóteses.....	50
4.1.4.	Levantamento de hipóteses.....	51
4.2.	LEVANTAMENTO DE DADOS .....	52
4.2.1.	Dados de performance .....	52
4.2.2.	Carregamento e transporte.....	53
4.2.3.	Medição dos tempos .....	54
4.2.4.	<i>Outliers</i> .....	56
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>57</b>
5.1.	DIMENSIONAMENTO E COMPATIBILIDADE.....	57
5.2.	VALIDAÇÃO DAS HIPÓTESES.....	62
5.2.1.	Hipótese (i) .....	62
5.2.2.	Hipótese (ii) .....	62
5.2.3.	Hipótese (iii).....	63
5.2.4.	Hipótese (iv) .....	66
5.3.	TOMADAS DE DECISÃO .....	67
5.4.	RESULTADOS OBTIDOS .....	71
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>75</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Em uma mineradora, existe um elevado custo associado aos equipamentos de carregamento e transporte (estes mais numerosos nas operações mineiras) tanto em sua aquisição quanto sua operação, com investimentos na escala dos milhões de dólares.

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

RUNGE (1998, *apud* LOPES, 2010, p.10), por sua vez, estratifica os custos operacionais relacionados ao transporte por caminhões, dividindo-os em 51,5% relacionados a manutenção e peças de reposição e 48,5% referentes à operação (Figura 1).

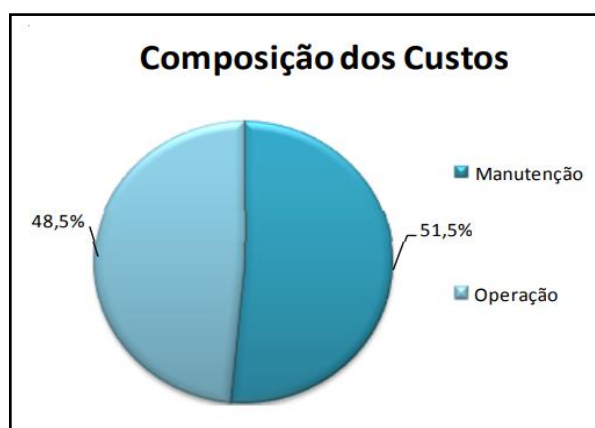


Figura 1: Composição dos custos operacionais de transporte.  
Fonte: RUNGE (1998, *apud* LOPES, 2010, p.10).

Segundo REVUELTA e JIMENO, cada elemento de custo (aquisição ou operação de mina) deve estar discriminado, como pagamento de mão-de-obra, aquisição de equipamentos, pagamento de serviços etc. O nível de detalhamento tem como finalidade definir a melhor estratégia para minimização dos custos, principalmente durante o planejamento de um novo empreendimento. em projetos de expansão ou contratação de empresas terceirizadas.

Em empreendimentos mineiros onde não se possui um conhecimento adequado dos parâmetros operacionais, e um estudo embasado, em indicadores de produção capazes de detectar incompatibilidade entre o porte e o tipo de equipamentos de carregamento e transporte, bem como, uma operação bem conjugada, pode acarretar uma redução da produtividade,

provocando um alto índice de desperdícios e uma elevação dos custos de operação. (SODRÉ, 2019)

Já nas minas de pequeno porte, com características peculiares, tais como: baixa taxa de produção, reaproveitamento de equipamentos de transportes de outras unidades, pequena disponibilidade de mão de obra especializada etc., como a abordada neste estudo, é comum não haver um sistema de despacho computadorizado e automático, devido a simplicidade de sua operação e o alto custo de implementação do sistema. Dessa forma, o sistema de despacho limita-se às decisões tomadas no dia a dia, estas nem sempre adequadas às condições de carregamento e transporte.

## 1.2. RELEVÂNCIA DO TRABALHO

A competitividade em todos os tipos de negócios impulsiona cada vez mais a redução de custos e maximização de lucros. Empresas de grande porte, que contam com uma frota numerosa de veículos de carregamento e transporte, otimizam a utilização dos seus equipamentos com sistemas de despacho eletrônico, por meio de algoritmos e simulações computacionais, visando minimizar os desperdícios. Em contrapartida, empresas de pequeno porte buscam a maior produtividade de seus equipamentos para manterem-se competitivas, por meio da utilização de sistemáticas manuais e empíricas, na maioria das vezes sem um embasamento técnico sistemático aprofundado para este fim.

Os tradicionais métodos utilizados para os dimensionamentos, baseiam-se na experiência dos tomadores de decisão ou nas informações obtidas em manuais técnicos das empresas fornecedoras dos equipamentos, o que pode ocasionar grandes desperdícios, diminuição da produtividade e, até mesmo elevação dos custos de produção (QUEVEDO, 2009 *apud* SODRÉ, 2019, p. 2).

Em 2021, o empreendimento objeto deste estudo vivenciou um acréscimo de 11% na produção e comercialização de calcário agrícola e agregados em relação ao ano anterior. A tendência é que, para o futuro, a venda destes insumos aumente ainda mais e para isso, a eficiência das operações mineiras precisa ser elevada para acompanhar a demanda de material.

Por outro lado, como em qualquer outro empreendimento, devido às restrições financeiras, logísticas ou técnicas, os parâmetros ideais de operação preestabelecidos podem não ser cumpridos, provocando a necessidade de adaptações, de forma que a otimização de cenários alternativos se faça necessária, sendo este um horizonte ainda pouco explorado.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo alavancar a produtividade dos equipamentos de uma mina que não dispõe de sistema de despacho eletrônico, nos diferentes *layouts* possíveis de operação, realizando um estudo preliminar do dimensionamento de frota e impacto nos KPI's de uma lavra de pequeno porte, através do monitoramento dos indicadores de produtividade dos equipamentos.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

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

- ❖ Medição dos tempos de ciclos dos equipamentos de carregamento e transporte;
- ❖ Revisão do dimensionamento da frota;
- ❖ Cálculo das produtividades dos diferentes equipamentos em condições reais;
- ❖ Identificação das causas raízes dos desperdícios;
- ❖ Realização de análises granulométricas;
- ❖ Análises dos *layouts* buscando otimização do carregamento e transporte;
- ❖ Elucidação das tratativas tomadas para maximização dos indicadores.



### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. OPERAÇÕES MINEIRAS**

As operações mineiras compreendem todos os processos realizados para extrair o material de interesse, do local de seu jazimento e levá-lo à planta de beneficiamento, bem como para a remoção da rocha encaixante ou do solo e o transporte, destes, para os depósitos de estéril.

HARTMAN (2002) considera que as atividades de mineração são realizadas de maneira cíclica, usando uma série de etapas fundamentais para transportar o material que está sendo extraído até o destino. Essas etapas são chamadas de operações unitárias de mineração, das quais se destacam a perfuração, o desmonte, o carregamento e o transporte. QUAGLIO (2003), por sua vez, estratificando ainda mais as atividades mineiras, as divide em decapeamento, perfuração de rocha, carregamento de explosivo, detonação, carregamento e transporte.

##### **3.1.1. Decapeamento**

O decapeamento é a atividade de remoção das camadas superficiais (capeamento) sem valor econômico que recobre o minério, executada durante o desenvolvimento da cava (Figura 2). BRANDI (1994) ressalta que o capeamento é composto por latossolos e/ou rochas, que devem ser armazenados a fim de serem utilizados para a recuperação da área degradada, durante o fechamento de mina, conforme o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas de cada empreendimento.

Segundo SANTOS (2017) as camadas superficiais do solo, em geral apresentam teores mais elevados de matéria orgânica, atividade microbiana, nutrientes e banco de sementes que podem ser utilizados com grande vantagem na revegetação. A estocagem e reutilização dessas camadas superficiais do solo facilitam o processo de recuperação da área degradada.

Ainda, segundo SANTOS (2017), quando o capeamento não é reutilizado na recuperação destas áreas, o crescimento das plantas pode ser limitado por condições irregulares de umidade, pela presença de sais e elevado calor, provocados pela utilização de solos inadequados.



Figura 2: Atividade de decapeamento. Fonte: Autoria Própria

### 3.1.2. Perfuração

Para SILVA (2009), a perfuração de rocha, dentro do contexto da mineração, é a primeira operação que se realiza e tem como finalidade abrir furos com uma distribuição e geometria adequada dentro dos maciços para alojar as cargas de explosivos e acessórios iniciadores. A perfuração de rocha na mineração exige a manipulação tanto de equipamentos mecanizados modernos com grandes capacidades produtivas, usados nos furos de produção, como também de pequeno porte, que proporcionam viabilidade econômica na perfuração de áreas menores de desenvolvimento, repés e matacos (Figura 3).

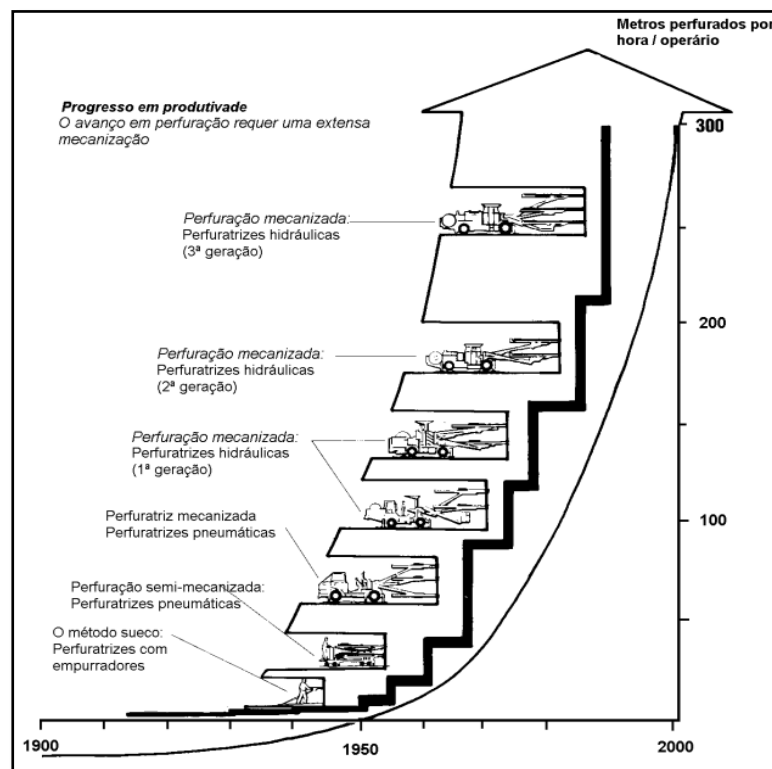


Figura 3: Progressão da produtividade das perfuratrizes. Fonte: Adaptado de Silva (2009)

A correta execução da perfuração, assegurando que os furos efetivamente sejam executados segundo o plano de fogo, mantendo a malha estabelecida, a correta inclinação e retilinidade são condições essenciais para garantir que os objetivos do desmonte sejam alcançados (KOPPE & COSTA, 2012).

Para SILVA (2009), os principais métodos de perfuração para o desmonte de rochas com explosivos aplicados à mineração são as perfurações rotativas e as rotopercurssivas.

### 3.1.2.1. Perfuração rotativa

Segundo SILVA (2009), os princípios físicos da perfuração rotativa se dão por meio da trituração e abrasão (corte) da rocha por uma coroa resistente, comumente adiamantada ou com botões de metal duro, sendo o tipo mais indicado para perfurações de alto calibre e grande profundidade.

Quando o princípio físico é a trituração, a energia é transmitida para a broca por hastes que giram e pressionam o bit contra a rocha. Os botões de metal duro são empurrados contra as rochas em pressões de até 5000 bar, causando o fraturamento desta.

Já na abrasão ou corte, a perfuração necessita de uma forte capacidade de empuxo na broca e um mecanismo superior de rotação, onde a pressão aplicada e o torque rompem e moem a rocha. Neste método a energia é transmitida à coroa pela haste de perfuração, que gira e pressiona a coroa sobre a rocha em pressões de até 1500 bar. A área de corte da ferramenta exerce grande força sobre a rocha e as lascas são arrancadas.

Os principais componentes de uma perfuratriz rotativa são: compressor, motor de rotação, cabeça rotativa, sistema de elevação e avanço, haste, estabilizador e coroa (Figura 4).

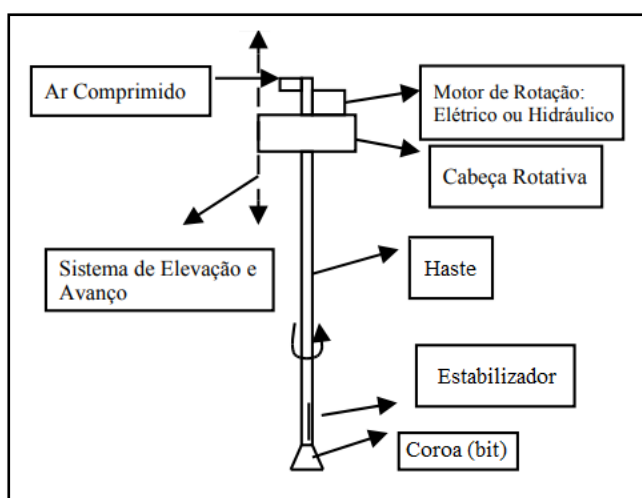


Figura 4: Principais componentes de um sistema de perfuração rotativo.  
Fonte: Adaptado de JIMENO (2004, *apud* SILVA, 2011, p. 11)

### 3.1.2.2. Perfuração rotopercussiva

De acordo com SILVA (2009) este método de perfuração se dá pela transmissão de impactos sobre a rocha por uma barra de percussão, das hastes e da broca, onde um movimento de rotação faz girar a coluna de perfuração para que se produzam impactos sobre a rocha em diferentes posições.

As perfuratrizes rotopercurssivas são divididas em dois grandes grupos: Martelo de Superfície (Top-Hammer) e Martelo de Fundo de Furo (Down the Hole), baseado na posição do martelo (Figura 5).

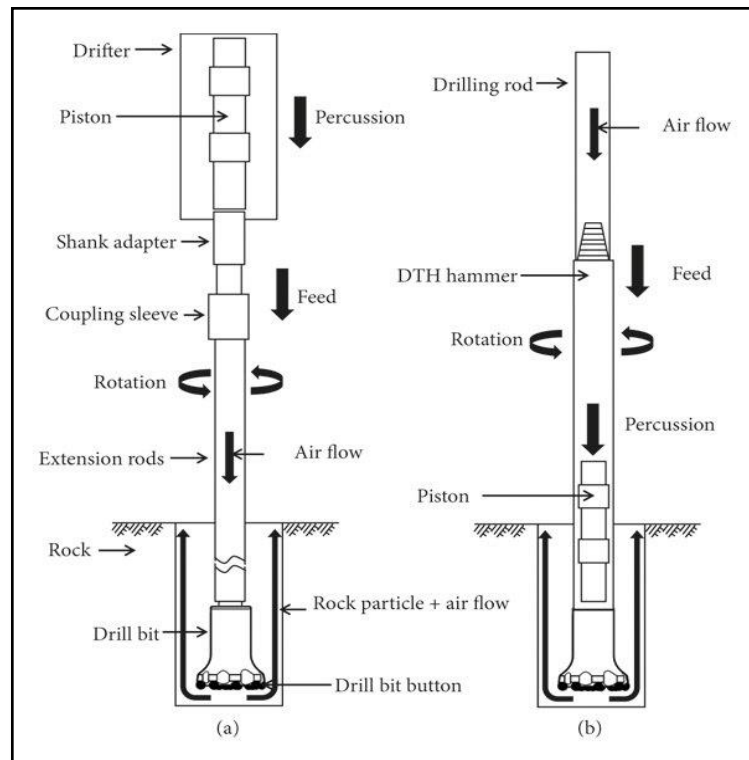


Figura 5: Componentes básicos do Martelo de Superfície (a) e Martelo de Fundo de Furo (b).  
Fonte: Kim *et. al.* 2020.

### 3.1.3. Desmorte

O desmorte por explosivos (Figura 6) consiste em uma reação exotérmica extremamente rápida, onde os materiais explosivos são capazes de se transformar em frações de microssegundos em uma massa de gases. (CAVADAS, 2012 *apud* ZORZAL, 2019, p.7). Essa massa de gases em rápida expansão confinadas nos furos provocam a ruptura do maciço rochoso.



Figura 6: Desmonte de rocha por explosivos. Fonte: Autoria própria

A fase de desmonte compreende as etapas de carregamento de explosivos, amarração dos furos e detonação do maciço, com objetivo de desagregar e fragmentar a rocha, possibilitando o carregamento posterior.

Segundo KOPPE & COSTA (2012), o planejamento do desmonte com utilização de explosivos é influenciado por diversos fatores os quais necessitam de controle para que os objetivos pretendidos do desmonte sejam efetivamente alcançados. A escolha do método e dos equipamentos de perfuração, a distribuição, o diâmetro e profundidade dos furos, o tipo de explosivo a ser utilizado e a qualificação da equipe de desmonte são, por exemplo, fatores relevantes para o sucesso do desmonte.

OLIVEIRA (2017) afirma que para o desmonte atender aos requisitos de fragmentação, estes definidos em função do porte dos equipamentos disponíveis, deve-se seguir o plano de fogo, levando em consideração todas as variáveis existentes do processo, sendo algumas delas controláveis e outras não controláveis.

Das variáveis controláveis, podem ser citadas: o diâmetro, a profundidade e a inclinação dos furos, a geometria da malha, o tipo e densidade do explosivo utilizado etc. Entre as variáveis não controláveis estão aquelas relacionadas às condições geológicas do maciço, como as presenças de bolsões de argila, de trincas e famílias de falhas etc.

SILVA (2009) pontua os principais fatores para escolha do diâmetro do furo, como a granulometria desejada após a detonação, tipo de explosivo a ser utilizado, vibração máxima admissível do terreno e o porte dos equipamentos disponíveis para perfuração, carregamento e transporte (Figura 7).

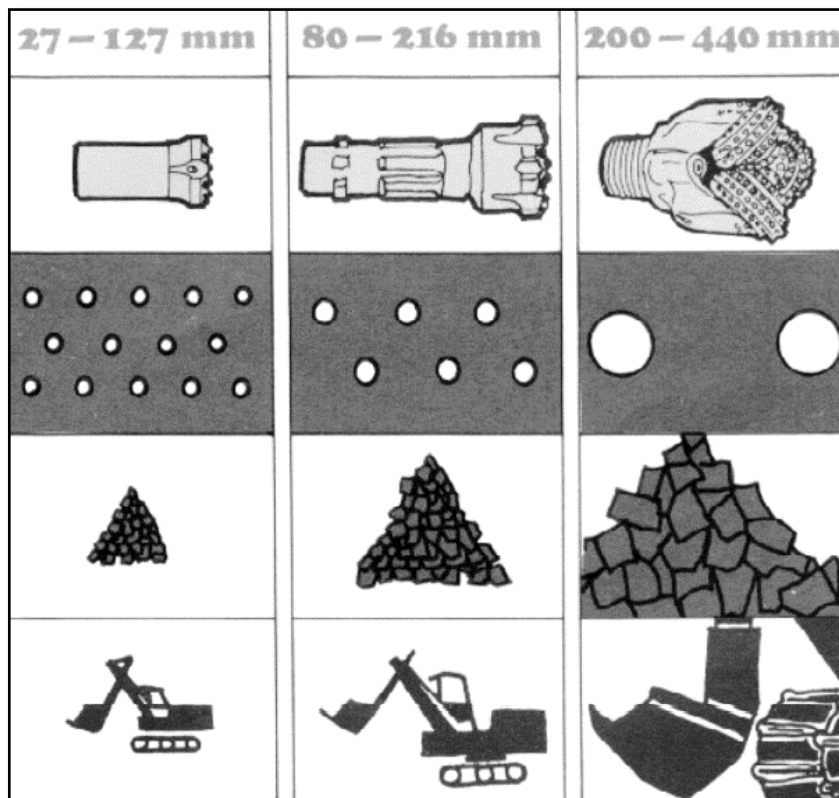


Figura 7: Influência do diâmetro e nº de furos na fragmentação de rocha, altura da pilha e no porte do equipamento de carregamento. Fonte: SILVA (2009)

SILVA (2009) ressalta que a quantidade de explosivo necessário para realizar o desmonte de uma bancada depende:

- ❖ do diâmetro do furo;
- ❖ da altura da bancada;
- ❖ do ângulo de perfuração;
- ❖ densidade e tipo de explosivo utilizado;
- ❖ densidade da rocha.

SILVA (2009) afirma, ainda, que estas variáveis são importantes para definição de parâmetros da malha de perfuração, como afastamento, espaçamento, subfuração etc. e define as equações para o cálculo de cada um destes parâmetros em função das seguintes variáveis a seguir.

Afastamento (A): Menor distância do furo à face livre da bancada ou a menor distância de uma linha de furos a outra, expresso pela (Equação 1):

$$A = 0,0123 \left[ 2 \frac{\rho_e}{\rho_r} + 1,5 \right] * d_e$$

*Equação 1: Cálculo de afastamento*

Onde:

$\rho_e$  = densidade do explosivo (g/cm<sup>3</sup>);

$\rho_r$  = densidade da rocha (g/cm<sup>3</sup>);

$d_e$  = diâmetro do explosivo/furo (mm).

Espaçamento (E): É a distância entre dois furos de uma mesma linha. No caso de bancadas baixas, onde  $H_b/A < 4$ , o espaçamento dos furos detonados com retardo pode ser expresso pela (Equação 2):

$$E = \frac{(H_b + 7A)}{8}$$

*Equação 2: Cálculo do espaçamento em bancadas baixas com retardos entre furos*

Onde:

$H_b$  = Altura da bancada.

Já para bancadas altas, onde  $H_b/A > 4$ , o espaçamento dos furos detonados com retardo pode ser expresso pela (Equação 3):

$$E = 1,4 A$$

*Equação 3: Cálculo do espaçamento em bancadas altas com retardos entre furos*

Profundidade do Furo ( $H_f$ ): É o comprimento total do furo, este maior que a altura da bancada devido a inclinação de perfuração ( $\alpha$ ) e subfuração (S). Para calcular a profundidade do furo utiliza-se a (Equação 4).

$$H_f = \frac{H_b}{\cos \alpha} + \left( 1 - \frac{\alpha}{100} \right) * S$$

*Equação 4: Cálculo da profundidade do furo*

Subfuração (S): É o comprimento perfurado abaixo da bancada a ser atingida. A necessidade de sua execução decorre do engastamento da rocha no pé da bancada que pode ocasionar na formação dos repés<sup>1</sup>. A subfuração pode ser calculada pela (Equação 5):

$$S = 0,3 A$$

*Equação 5: Cálculo da altura de subfuração*

Tampão (T): Parte superior do furo que não é carregada com explosivo, mas sim com um material inerte, com finalidade de confinar os gases explosivos. O confinamento adequado é necessário para que a carga explosiva emita a máxima energia e evite ultralançamentos de fragmentos rochosos. A altura do tampão pode ser calculada pela (Equação 6):

$$T = 0,7 A$$

*Equação 6: Cálculo da altura do tampão*

Razão Linear de Carregamento (RL): representa a razão de massa de explosivo necessária por metro linear de perfuração, que pode ser calculada pela (Equação 7):

$$RL = \frac{\pi * d_e^2}{4000} * \rho_e$$

*Equação 7: Cálculo da Razão Linear de Carregamento*

Carga Explosiva (CE): Representa a massa de explosivo necessária para carregamento de um furo. A Carga Explosiva pode ser calculada pela (Equação 8):

$$CE = RL * (H_f - T)$$

*Equação 8: Cálculo da Carga Explosiva.*

Portanto, a massa total (mt) de explosivo necessária para detonação em uma bancada pode ser obtida através da multiplicação da Carga Explosiva pelo número de furos executados, conforme (Equação 9):

$$mt = CE * n^o \text{ furos}$$

*Equação 9: Massa total de explosivos necessária*

SILVA (2009), afirma que uma fragmentação inadequada pode resultar em aumentos nos custos de carregamento, transporte, britagem e manutenção, gerando problemas como o menor

---

<sup>1</sup> Repé – irregularidade junto ao pé da bancada, formada por rochas não fragmentadas durante a detonação. (IRAMINA, 2015).



enchimento das caçambas, aumento nos tempos de ciclo dos equipamentos, engaiolamentos de blocos no britador etc. BEYGLOU (2016, *apud* COUTINHO, 2017, p. 21) afirma que os efeitos da fragmentação realizado no desmonte são vistos primeiramente no carregamento, independentemente do tipo de equipamento utilizado, pois a fragmentação desempenha um papel fundamental na eficiência de carregamento.

### 3.1.4. Carregamento

Segundo BASTOS (2013) e QUIQUIA (2015), o carregamento é uma operação unitária de um empreendimento mineiro, realizada em circuito fechado com a operação de transporte (Figura 8), composta pelas seguintes etapas de acordo com (SILVA, 2011):

- ❖ enchimento da concha da unidade de carregamento;
- ❖ giro cheio até o local de descarregamento;
- ❖ descarregamento do material sobre a unidade transportadora;
- ❖ giro vazio até o local de carregamento.

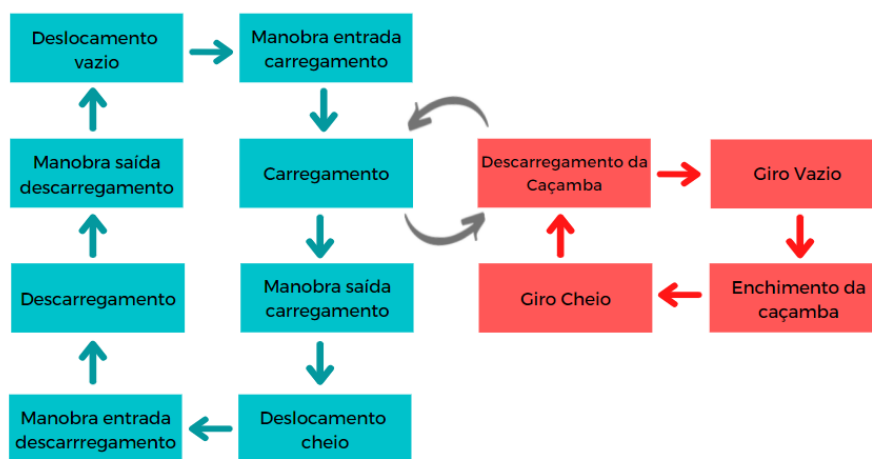


Figura 8: Fluxograma do circuito fechado entre as atividades de transporte (azul) e carregamento (vermelho).  
Fonte: Autoria própria

Esta operação caracteriza-se pela remoção do material desmontado da frente de trabalho, com destino a enviá-lo à planta de beneficiamento, à pilha pulmão ou ao depósito de estéril, de acordo com o valor econômico ou estratégico de cada material. Esta atividade envolve diversos

conceitos fundamentais necessários para estimativa de produção, descritos por SILVA (2011), como a seguir.

Volume da caçamba (Vc): deve representar a capacidade operacional, rasa ou coroadada (Figura 9) conforme o caso, dos equipamentos de carregamento e transporte. BORGES (2013) define a fórmula para o volume da caçamba pela Equação (10):

$$Vc = \frac{Cma}{\gamma_s}$$

*Equação 10: Cálculo do Volume da caçamba*

onde:

Cma = carga máxima admissível na caçamba;

$\gamma_s$  = peso específico do material solto ou empolado;

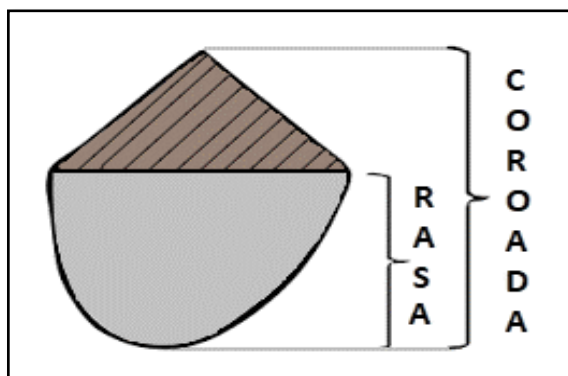


Figura 9: Representação da capacidade de enchimento rasa e coroadada de uma caçamba de escavadeira. Fonte: Autoria própria

Empolamento (e): é o aumento aparente de volume que a rocha apresenta depois de fragmentada, ou mais amplamente, é o aumento aparente de volume em relação a um estado anterior de maior compactação, calculado pela Equação (11):

$$e = \left( \frac{\gamma_c}{\gamma_s} - 1 \right) \times 100$$

*Equação 11: Cálculo do Empolamento*

onde:

$\gamma_c$  = peso específico do material no corte.

Carga de tombamento (tipping-load): é a carga que faz com que uma escavadeira hidráulica equipada para determinada finalidade e, considerando a posição em que a sustentação é mais desfavorável, perca o equilíbrio e tombe.

Carga útil (pay-load): é a carga que não ultrapassa 80% do “tipping-load” (fator de segurança de  $100/80 = 25\%$ )

BORGES (2013) categoriza pás carregadeiras, escavadeiras, dragas e motoscrapers, como os equipamentos de carregamento mais comuns na mineração em todo o mundo. O autor estratifica ainda mais sua análise ao considerar as escavadeiras do tipo shovel como as mais comuns de serem encontradas em empreendimentos mineiros no Brasil.

Com intuito de focar apenas nos equipamentos de carregamento presentes na mina objeto de estudo, apenas as carregadeiras e escavadeiras serão descritas neste capítulo.

#### 3.1.4.1. Pá carregadeira

As pás carregadeiras (Figura 10) são os equipamentos de carregamento mais ágeis na mineração. Construídas normalmente sobre rodas e equipadas com uma caçamba frontal acionada por comandos hidráulicos, estes equipamentos são adequados para situações que exijam constantes mudanças de frente de lavra, pois estas não necessitam do apoio do semirreboque (carreta prancha) para deslocar entre pontos de carregamento, podendo deslocar a grandes distâncias pelas suas próprias forças, eliminando o custo elevado e as dificuldades inerentes ao transporte por carretas, conforme afirmam RICARDO e CATALANI (2007).



Figura 10: Modelo 3D de pá Carregadeira KOMATSU WA 900. Fonte: RenderHub (2021).

### 3.1.4.2. Escavadeira

As escavadeiras são equipamentos de carga mais robustos e de maiores dimensões comumente montados sobre esteira, mais adequados para operação em taludes de maiores dimensões. O acionamento dos elementos móveis das escavadeiras pode ser feito por cabrestantes e cabos de aço (Figura 11), cilindros hidráulicos (Figura 12) e motores elétricos e a combustão; essa grande variabilidade de modelos cria um leque de opções para o dimensionamento de frota.

Conforme citam RICARDO e CATALANI (2007), as escavadeiras são equipamentos de trabalho estático, isto é, seus sistemas rodantes se destinam apenas a lhes permitirem o deslocamento, sem, contudo, participar do ciclo de trabalho, como as carregadeiras. Os autores acrescentam que, dependendo do tipo de lança utilizada, estes equipamentos podem ser empregados em trabalhos bastante diversos de acordo com o porte do empreendimento, porte das bancadas de trabalho, seletividade de lavra etc.

Os principais tipos de lança são:

- ❖ Lança com caçamba de arrasto ou “drag-line” (Figura 11);
- ❖ Lança com pá frontal ou “shovel” (Figura 12);
- ❖ Lança retroescavadora, “back-shovel”.



Figura 11: Escavadeira Drag-line CAT 8200 com acionamento a cabo.  
Fonte: RenderHub. (2021)



Figura 12: Escavadeira Shovel KOMATSU PC 8000 de acionamento hidráulico.  
Fonte: RenderHub (2021)

### 3.1.5 Transporte

Dentre os diversos métodos de transporte de material, vagões, correias transportadoras, caminhões etc., o transporte realizado por caminhões é o mais comum na maioria das minas de céu aberto, sendo também dentre os diversos métodos o mais versátil.

Segundo COUTINHO (2017), o processo de transporte por caminhões tem por objetivo deslocar o material desde sua origem na frente de lavra até o seu destino da mina: o minério deve ser transportado para planta de beneficiamento (descrita no Capítulo 4.1) e o estéril para as pilhas/depósitos de estéril. Com intuito de focar apenas nos equipamentos de transporte presentes na mina objeto de estudo, apenas o transporte por caminhões e o transporte por correias transportadoras serão descritos neste capítulo.

#### 3.1.4.3. Transporte por caminhões

O sistema de transporte por caminhões é tradicionalmente o preferido pelos engenheiros de minas, devido à grande flexibilidade e mobilidade dos equipamentos (KOPPE & COSTA, 2012). A manutenção das estradas da mina é crucial para o sucesso de uma mineradora, pois reflete na atividade de maior custo operacional dentro da mineração, o transporte por caminhões. Boas condições das vias geram impactos na produtividade dos equipamentos de transporte e nos custos relacionados à manutenção de veículos, implicando menores tempos de ciclo, segurança operacional e menor número de falhas mecânicas relacionadas ao sistema

rodante ou suspensão. As pistas de rolagem devem possuir piso firme, nivelado e livre de rochas, garantindo condições seguras de acesso ao ponto de carregamento e um transporte com maior eficiência.

Para COUTINHO (2017) os projetos de vias de acesso e praças de carregamento precisam seguir à Norma Regulamentadora 22 - NR-22 (GOVERNO FEDERAL, 2020) referente às condições de saúde e segurança, a qual define no parágrafo 22.7 que toda mina deve possuir plano de trânsito, estabelecendo regras de preferência de movimentação, velocidades máximas e distâncias mínimas entre máquinas, equipamentos e veículos compatíveis com a segurança, de acordo com as condições das pistas de rolamento. A NR-22 também define a largura mínima das vias de trânsito, sendo essa pelo menos duas vezes maior que a largura do caminhão (A) em pista simples e três vezes maior em pista dupla. Um distanciamento de segurança (B) pode ser adotado por cada empreendimento, em locais onde há risco de queda de veículos, como cristas de bancadas (Figura 13). A padronização dessas práticas leva ao aumento da segurança no tráfego da mina, à redução do tempo de ciclo, ao menor desgaste dos equipamentos, entre outros benefícios.

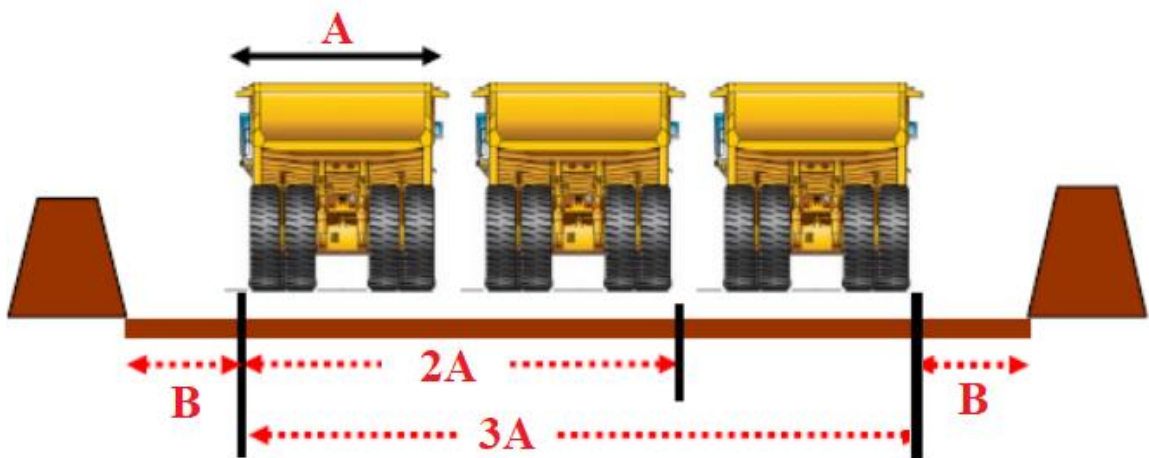


Figura 13: Largura da via em função da largura dos caminhões. Fonte: Adaptado de COUTINHO (2017)

As montadoras de caminhões oferecem equipamentos com capacidades variando de 10 a 450 toneladas, aproximadamente. Atualmente o modelo Belaz 75710 (Figura 14) detém o recorde de maior capacidade de carga do mundo, 450 t.



Figura 14: BELAZ 75710, caminhão com capacidade de 450 toneladas. Fonte: BELAZ (2021).

Para LOPES (2010), algumas vantagens e desvantagens do transporte realizado por caminhões são descritas como sendo:

#### Vantagens

- ❖ Alta flexibilidade operacional;
- ❖ Lavras simultâneas em várias frentes, facilitando a blendagem;
- ❖ Realocação dos veículos para produção de estéril;
- ❖ Facilidade de contratação de mão de obra;
- ❖ Independência entre os equipamentos de transporte;

#### Desvantagens:

- ❖ Baixa eficiência energética;
- ❖ Elevado tempo de deslocamento vazio;
- ❖ Limitada pela inclinação das vias (até 10% de inclinação);
- ❖ Custo elevado para abertura e conservação das vias;
- ❖ Afetado por intempéries;
- ❖ Número de equipamentos necessários sensível à DMT;

#### 3.1.4.4. Transporte por correias transportadoras

LOPES (2010) define este método como um sistema motorizado que movimenta um tapete que circula por um leito apoiado a roletes e rolos, formando um sistema de fluxo de material que se inicia no carregamento, passa pelo transporte e termina na descarga (Figura 15). As correias por sua vez são alimentadas por carregadeiras locadas nas frentes de lavra que

transportam o material a uma distância máxima de 95 metros, até chegar à correia. A partir desta distância é necessário realizar a extensão da correia, pois este processo de alimentação começa a se tornar inviável economicamente.



Figura 15: Correia transportadora em operação. Fonte: CSEM (2020).

Segundo COUTINHO (2017), a montagem e desmontagem de correias transportadoras envolve várias etapas definidas no planejamento de mina. Nestas etapas são definidos os ritmos de produção, e, portanto, a velocidade e capacidade das correias; o layout, contemplando a inclinação, a elevação, os raios de curvatura e o comprimento; e o posicionamento, é definido pelo planejamento de lavra (Figura 16).

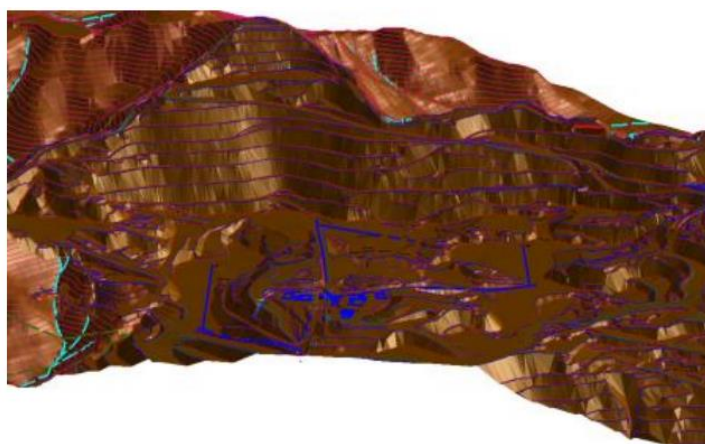


Figura 16: Plano de lavra e layout de correias, em azul, executado na SAMARCO. Fonte: COUTINHO (2017)

Segundo COUTINHO (2017), algumas vantagens e desvantagens do transporte realizado por correias transportadoras são:



Vantagens:

- ❖ Envolvem fundações leves
- ❖ Suporta inclinações de até 30% sem perder eficiência;
- ❖ Facilidade de vencer obstáculos;
- ❖ Demanda energética uniforme;
- ❖ Baixo custo de manutenção;
- ❖ Pode gerar energia em transporte descendente;
- ❖ Reduz os custos com mão de obra;
- ❖ Não é afetado por intempéries;
- ❖ Riscos de acidentes reduzidos;
- ❖ Baixa emissão de gases e consumo de diesel;

Desvantagens:

- ❖ Baixa flexibilidade;
- ❖ Gera paradas na produção para realocação das correias;
- ❖ Dificuldade de garantir a “blendagem”;
- ❖ Requer planejamento detalhado de curto e médio prazo;
- ❖ Suscetível a danos durante as detonações;
- ❖ Granulometria limitada pelo sistema;
- ❖ Requer mão de obra especializada;

### 3.2 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO EQUIPAMENTOS

Segundo BORGES (2013), os equipamentos de carregamento são tipicamente selecionados para corresponder às condições de minas em termos de produtividade, condições climáticas, exigências de mobilidade e ao número de frentes de lavra. Para SILVA (2011), os principais critérios na seleção dos equipamentos são:

- ❖ a geologia do depósito;
- ❖ porte das jazidas;
- ❖ projeto da cava: altura das bancadas, largura das frentes de trabalho e outros fatores geométricos;
- ❖ a necessidade de produção;
- ❖ a vida útil do projeto;

- ❖ disponibilidade de capital;
- ❖ custo de operação;
- ❖ parâmetros geotécnicos;
- ❖ recuperação dos recursos;
- ❖ interferências com o meio ambiente;
- ❖ infraestrutura de apoio: manutenção, abastecimento, comunicações etc.

De tal forma que, ao analisar cada um destes critérios, é possível reduzir o escopo de equipamentos disponíveis no mercado para somente aqueles que atendem às condições específicas do empreendimento.

SRAJER *et al.* (1989, *apud* SILVA, 2016, p. 22) concluíram que, apesar das considerações acima, o conhecimento pessoal e experiência do engenheiro de minas ou do gerente com o equipamento de carga é a principal influência sobre a escolha dos equipamentos.

### 3.3 COMPATIBILIDADE ENTRE EQUIPAMENTOS

Após selecionados os equipamentos que atendam aos critérios apresentados por SILVA (2011) e cumprem as produtividades necessárias ao empreendimento, é importante selecionar também o porte dos equipamentos que irão operar de maneira conjugada.

COUTINHO (2017) afirma que a compatibilidade entre os equipamentos de lavra de toda a frota é um dos fatores chave para que se alcance um menor tempo de ciclo, uma maior produtividade e um menor custo operacional. Desde o dimensionamento destes equipamentos, deve-se ajustar os desempenhos, modelos e quantidades de máquinas segundo a produção requerida.

No caso de transporte por caminhões, o carregamento, para ser eficiente, deve ser realizado com escavadeiras, consideradas compatíveis em relação ao número de ciclos de carregamento necessário para preencher a caçamba da unidade transportadora. SILVA (2011) considera 3 (três) a 5 (cinco) ciclos (caçambadas) um bom equilíbrio entre o porte dos equipamentos de carregamento e transporte. Um número menor de ciclos seria preferível, contando que:

- ❖ o tamanho da caçamba da unidade de transporte não seja muito pequeno em comparação com o tamanho da caçamba da unidade de carregamento, resultando em impactos sobre a suspensão e a estrutura do veículo e derramamento excessivo da carga;

❖ o tempo de carregamento não seja tão curto que ocasione a demora da chegada da unidade de transporte seguinte, ocasionando um tempo excessivo de espera por parte da unidade de carregamento.

❖ o número de unidades de transporte para cada unidade de carregamento. Se este número for muito pequeno poderá ocorrer ociosidade da unidade de carregamento; se o contrário, é provável que ocorram filas dos equipamentos de transporte.

❖ o número excessivo de unidades da frota, ocasionando dificuldades de tráfego, manutenção e maiores custos.

Em contrapartida, PERONI (2015, *apud* COUTINHO, 2017, p.19), acredita que a relação ótima do número de passes não deve ser menor do que 3 (três) e nem maior do que 6 (seis). Quando o número de ciclos estiver fora deste intervalo, o dimensionamento dos equipamentos de carregamento ou transporte deve ser revisto.

Em relação ao comprimento do braço hidráulico que iça a caçamba de carga, este deve ser longo o suficiente para pelo menos alcançar o centro da caçamba do veículo de transporte, no caso de pás carregadeiras, no sentido transversal (Figura 17), no caso de escavadeiras, no sentido longitudinal, para que o material seja depositado de forma centralizada. A melhor centralização da carga nos caminhões evita torções e esforços excessivos nas suspensões e chassi dos caminhões, prolongando assim a vida útil do equipamento e incorrendo em menor custo com reformas das básculas dos caminhões (COUTINHO, 2017).



Figura 17: Centralização de carga na balsa dos caminhões. Fonte: COUTINHO (2017).

CURI (2017) recomenda a utilização, na medida do possível, de equipamentos similares, tanto na lavra de minério quanto na remoção de estéril, possibilitando a substituição eventual

dos equipamentos quando houver quebras ou demandas inesperadas de produção. Se os materiais do minério e do estéril forem de constituição similar isto será uma vantagem, pois possibilitará que as mesmas combinações de equipamentos sejam empregadas.

PADAN (1960, *apud* BARBOSA, 2020, p. 27) por sua vez, correlacionam a distância média de transporte, com o porte da escavadeira, para definir o porte de caminhão mais econômico para o ciclo, conforme a carta de seleção mostrada na (Figura 18).

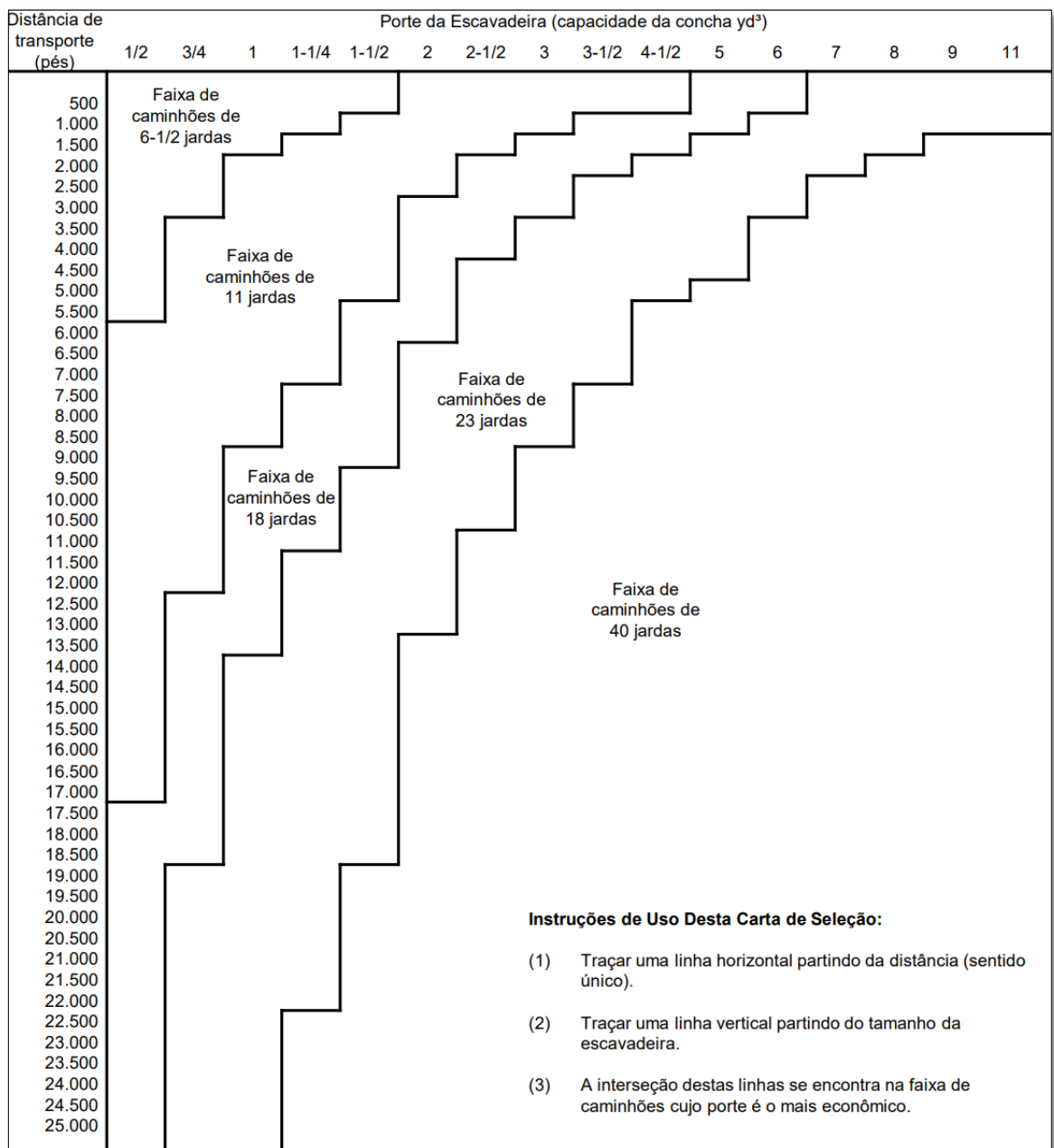


Figura 18: Carta de seleção de porte de equipamento. Adaptado de PADAN (1960)

### 3.4 PRODUTIVIDADE DE EQUIPAMENTOS DE CARGA E TRANSPORTE

A produtividade, nos equipamentos de carregamento e transporte, representa a taxa de movimentação de material em determinado período. Esta taxa, calculada através do produto da produtividade horária pelas horas programadas do equipamento, representa a produção teórica de massa ou volume de uma máquina por unidade de tempo, geralmente em toneladas por mês.

A produtividade horária ( $P_{hor}$ ) dos equipamentos de carregamento pode ser calculada pela (Equação 12):

$$P_{hor} = \frac{V * FE}{TC}$$

*Equação 12: Produtividade horária dos equipamentos de carregamento.*

Onde:

V = Volume da caçamba;

FE = Fator de enchimento, definido pela porcentagem do volume da caçamba que é de fato, preenchida com material;

TC = tempo de ciclo, em horas.

SILVA (2009) relaciona a produtividade das frotas de carregamento e transporte com o projeto e planejamento da cava, pontuando a importância da seleção do método correto de lavra e seleção adequada dos equipamentos mediante às operações unitárias existentes. A correta seleção do método de lavra, bem como o dimensionamento assertivo dos equipamentos de carregamento e transporte, garante a maior eficiência operacional e, portanto, a maior produtividade dos equipamentos.

Para RICARDO E CATALANI (2007), a estimativa da produção de equipamentos de carregamento não é um processo preciso, pois depende de fatores aleatórios que influenciam diretamente o desempenho destes equipamentos, sendo assim, há a necessidade de recorrer aos julgamentos e opiniões de profissionais experientes para refinar os dados, objetivando estimativas mais aderentes à realidade.

### 3.5 INDICADORES DE PERFORMANCE (K.P.I.)

Para medir e monitorar a produtividade e eficiência dos equipamentos de carregamento e transporte de minérios, são usados os indicadores de desempenho universais, também chamados de KPI's (Key Performance Indicator). Para os equipamentos de carga, os mais utilizados são

a disponibilidade física, a utilização global, a relação entre as horas produtivas e improdutivas, a produtividade efetiva e o tempo de ciclo no carregamento (COUTINHO, 2017).

### 3.5.1 Disponibilidade Física

Segundo MOREIRA (2018), a disponibilidade física dos equipamentos corresponde à parcela das horas programadas em que o equipamento está apto para operar, isto é, não está à em manutenção, demonstrado na Equação (13):

$$DF = \frac{Hp - Hm}{Hp} \times 100$$

Equação (13): Disponibilidade física

Onde:

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

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

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

MOREIRA (2018) relaciona, ainda, que os fatores que podem reduzir a disponibilidade dos equipamentos como sendo:

- ❖ Manutenção corretiva
- ❖ Manutenção preventiva
- ❖ Operação em vários turnos
- ❖ Má organização da mina
- ❖ Esperas

### 3.5.2 Fator de utilização do equipamento

MOREIRA (2018) demonstra, também, que o fator utilização é aplicado sobre as horas disponíveis do equipamento, e é definido como o tempo que o equipamento está trabalhando. O fator de utilização é calculado pela Equação (14):

$$UF = \frac{Ht}{Hp - Hm} \times 100$$

Equação (14): Fator de utilização

Onde:

Ht = total de horas efetivamente trabalhadas;

### 3.5.3 Fator de Operação conjugada

Para SILVA (2011), a produção máxima de frotas em operação conjugada pode ser obtida pela análise da disponibilidade das frotas em função da probabilidade deste equipamento estar apto ao trabalho naquele instante (Equação 15).

$$P_n = P_{ed} * P_{ned} * C_r^n$$

Equação (15): Cálculo de probabilidade de unidades disponíveis

Onde:

$P_n$  = probabilidade de ter exatamente n unidades disponíveis;

$P_{ed}$  = probabilidade de uma unidade estar disponível;

$P_{ned}$  = probabilidade de uma unidade não estar disponível;

$C_r^n$  = combinação de itens tomados, sendo r em um certo tempo.

Calculando-se as probabilidades e procedendo-se ao somatório de todas as combinações possíveis entre os números de unidades em operação dos equipamentos de britagem, carregamento e transporte, associados às respectivas probabilidades e produções, tem-se a produção total do sistema (Equação 16).

$$P_s = \left( \sum_{i=0}^{nb} \sum_{j=0}^{nc} \sum_{y=0}^{nt} P_i P_j P_y \right) P$$

Equação (16): Produção total em função das probabilidades individuais

Onde:

$P_s$  = produção total do sistema;

nb = número de unidades de britagens;

nc = número de equipamentos de carregamento;

$n_t$  = número de equipamentos de transporte;  
 $P_i$  = probabilidade de  $i$  unidades de britagem operando;  
 $P_j$  = probabilidade de  $j$  unidades de carga operando;  
 $P_y$  = probabilidade de  $y$  unidades de transporte operando;  
 $P$  = menor valor entre a produção de  $i$  unidades de britagem,  $j$  unidades de carga e  $y$  unidades de transporte operando.

Desta maneira, o fator de operação conjugada é representado pelo valor percentual obtido pelo cálculo dos termos entre parênteses na (Equação 16).

### 3.5.4 Eficiência

Para SILVA (2011), o rendimento ou fator de eficiência ( $E$ ) à relação:

$$E = \frac{1}{1 + \frac{\sum T_p}{TC_{min}}}$$

Equação (17): Fator de eficiência

Onde:

$TC_{min}$  = tempo de ciclo mínimo;

$T_p$  = tempos de parada.

Nota-se que a eficiência é inversamente proporcional aos tempos de parada ( $T_p$ ), portanto a continuidade da operação é de suma importância para maximizar os lucros da empresa. Segundo MOREIRA (2018), os seguintes fatores irão diminuir a eficiência da operação:

- ❖ características do material, implicando nas condições das praças de carregamento, bancadas de serviço etc.;
- ❖ supervisão no trabalho, de modo a aumentar o foco da equipe, evitando tempos ociosos provocados pelo operador;
- ❖ esperas no britador, provocando tempos de parada das unidades de transporte;
- ❖ falta de caminhão, provocando tempos de parada das unidades de carregamento;
- ❖ maior ou menor habilidade do operador, implicando, por exemplo, em esperas da unidade de carregamento enquanto um operador de caminhão realiza manobra mais lentamente;
- ❖ interrupções para a limpeza da frente de lavra;



- ❖ desmontes de rochas, em que a presença de matacões, por exemplo, pode provocar tempos de espera das unidades de transportes durante o carregamento.

### 3.6 TEMPO DE CICLO

Segundo HARTMAN (1992, *apud* SOUSA JÚNIOR, 2012, p. 24), no processo de extração mineral há um número definido de tarefas básicas e fundamentais cuja reprodução regular e repetitiva constitui o ciclo de mineração.

Em geral, tarefas como carregamento, transporte, descarregamento e retorno são repetidas continuamente. A contabilização do tempo necessário para a realização de cada tarefa faz com que o somatório dos tempos necessário para completar um ciclo seja chamado de “tempo de ciclo” (SOUSA JÚNIOR, 2012)

RICARDO E CATALANI (2007) propõem o cálculo do tempo de ciclo mínimo ou efetivo como a somatória de todos os tempos elementares (Equação 18).

$$TC_{min} = \sum T_f + \sum T_v$$

Equação (18): Tempo de ciclo mínimo

Onde:

$TC_{min}$  = tempo de ciclo mínimo.

$T_f$  = tempos fixos (carga, descarga, manobra).

$T_v$  = tempos variáveis (deslocamento).

RICARDO E CATALANI (2007) também propõem o cálculo do tempo de ciclo efetivo, aquele realmente gasto pelo equipamento para executar o ciclo de operação, computando os tempos de parada (Equação 19).

$$TC_{ef} = TC_{min} + \sum T_p$$

Equação (19): Tempo de ciclo efetivo

Onde:

$TC_{ef}$  = tempo de ciclo efetivo

$T_p$  = tempos de parada

SILVA (2011) define um ciclo como o conjunto de operações executadas por um equipamento durante um certo período, voltando, em seguida à posição da qual iniciou as atividades. Verifica-se, assim, que um ciclo pode ser decomposto em uma sequência de

movimentos elementares repetidos consecutivos, e para cada equipamento, o ciclo é definido pelos seguintes movimentos elementares:

- ❖ Carregadeiras: avanço até a frente, carga da caçamba, manobra, avanço até o veículo de transporte, descarga, retorno vazio e manobra;
- ❖ Escavadeiras: carga da caçamba, giro carregado, descarga e giro vazio de retorno;
- ❖ Caminhões: carga da unidade, transporte carregado, manobra e descarga, retorno vazio, posicionamento para carga.

Para COUTINHO (2017), o tempo de ciclo ideal para cada carregamento está dentro do intervalo de 28 a 42 segundos, a depender do porte dos equipamentos operando de maneira conjugada, onde o tempo de enchimento na frente de lavra não deve exceder 12 segundos para cada passe, tempo ideal considerado para se obter uma boa produtividade. Caso o tempo esteja maior, pode ser que o material não esteja bem desagregado pelo desmonte, dificultando o enchimento.

### 3.7 SISTEMAS DE DESPACHO

Nas últimas décadas, a redução no custo de transporte foi alcançada principalmente por economia de escala, com o aumento do porte dos caminhões. Porém, devido ao gigantismo da indústria, os equipamentos chegaram próximo ao limite de tamanho. Assim, as oportunidades de redução de custo estão ligadas às possibilidades de aumento de produtividade com o gerenciamento ótimo do sistema de despacho na alocação de caminhões (MENA *et al*, 2013 *apud* COUTINHO, 2017, p. 26).

O ciclo de produção dos caminhões se inicia na alocação do caminhão para alguma frente de trabalho por meio de um sistema de despacho. Segundo TU e HUCKA (1985, *apud* PINTO, 2007, p.17), existem 3 tipos básicos de sistemas de despacho de caminhões:

- ❖ Sistema de despacho manual: utilizado desde a década de 60, trata-se da prática padrão de alocação de caminhões, na qual, o despachador fica em um ponto estratégico que lhe permite ter ampla visão da operação, e baseado em sua experiência e nas situações que está presenciando, envia instruções aos operadores dos caminhões através de radiocomunicadores ou gesticulando com os braços.

❖ Sistema de despacho semiautomático: um computador é programado para auxiliar o despachador na tomada de decisão referente a alocação dos caminhões. É chamado de semiautomático porque não dispensa o profissional despachador.

❖ Sistema de despacho automático: mais abordados na literatura, estes sistemas permitem o computador tomar decisões referentes a alocação dos veículos e enviá-los para as frentes de serviço sem a necessidade de um despachador.

### 3.8 ALOCAÇÃO DE CAMINHÕES

De acordo com RODRIGUES (2006), minas a céu aberto utilizam dois critérios para a alocação de caminhões: alocação estática e dinâmica. Na alocação estática, os caminhões são fixados a um ponto de carga e a um ponto de descarga, ou seja, o seu deslocamento ocorre apenas entre esses dois pontos, durante um determinado período. Na alocação dinâmica, a cada carga e/ou descarga, o caminhão é direcionado para um ponto específico, de acordo com critérios previamente estabelecidos.

Ainda segundo RODRIGUES (2006), a alocação estática ainda é o método mais utilizado nas minerações por não apresentar a obrigatoriedade de utilização de um sistema automático de alocação, porém esse método proporciona menor produtividade devido às filas de caminhões e à ociosidade dos equipamentos de carga.

### 3.9 CARACTERÍSTICAS DA FROTA

Uma frota de equipamentos de mineração é dita homogênea, quando, para uma mesma operação unitária, seja ela carregamento, transporte ou perfuração, são utilizados equipamentos semelhantes em capacidades produtivas teóricas e efetivas, ou seja, a título de cálculos de dimensionamento de frota, são considerados idênticos.

Dentre as diversas vantagens decorrentes de uma frota homogênea de caminhões, segundo ASSAKKAF (2013) *apud* DEMBETEMBE (2017, p. 20), destaca-se o menor impacto associado ao fenômeno da aglomeração, que ocorre quando os caminhões mais rápidos no ciclo, alcançam os caminhões mais lentos, forçando-os a reduzir à mesma velocidade do caminhão mais lento e, conseqüentemente, perdendo o eventual ganho de produtividade em potencial que seria obtido pelo caminhão mais rápido.

Da mesma forma, uma frota é dita heterogênea quando, para uma mesma operação unitária, são utilizados equipamentos que se diferem quanto as capacidades produtivas, interferindo no dimensionamento de frota, cálculos de produção, custos de operação e manutenção etc.

## 4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo, foi, a partir do levantamento de situações problemas gerados na operação de uma mina de calcário, avaliar os cenários produtivos que viabilizassem a melhor produtividade, tomando como base os relatórios gerados pelo sistema informatizado de apontamento de produção e gestão de resultados da empresa que foram analisados através do software Power BI. Os parâmetros operacionais gerados nessa análise, foram comparados com a revisão bibliográfica e os manuais de fabricante dos equipamentos, posteriormente confrontados com as medições de campo, a fim de gerar a melhor proposta operacional para a empresa.

### 4.1. ESTUDO DE CASO

Localizada sobre a Formação Xambioá, ao norte do Sistema Orogênico Tocantins, no setor denominado Cinturão Araguaia, entre os crátons Amazônico e São Francisco (Figura 19), a mina objeto de estudo caracteriza-se por uma lavra a céu aberto de pequeno porte, de extração de calcário, com capacidade produtiva aproximada de 2,8 Mt/ano.

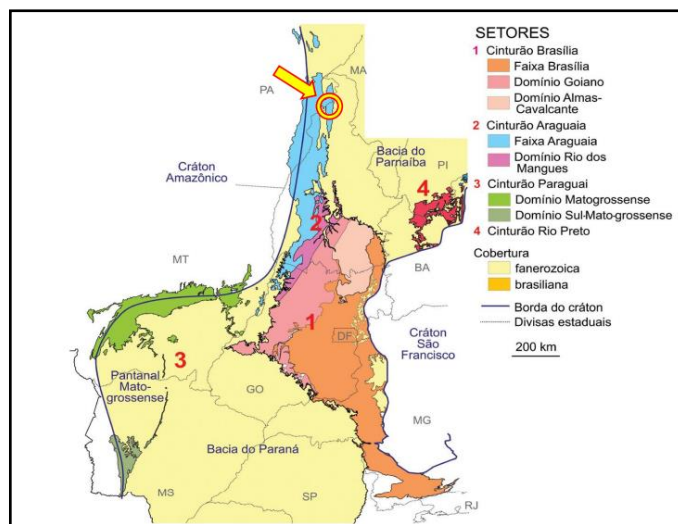


Figura 19 - Compartimentação tectônica do Sistema Orogênico Tocantins. Em destaque, a região da mina (TO).

Fonte: HASUI *et al.* (2012)

No empreendimento em estudo, são aproveitados o calcário calcítico, o calcário dolomítico, as argilas e os xistos friáveis. O calcário calcítico é utilizado para a produção de cimento, e o calcário dolomítico é vendido como agregado siderúrgico e corretivo agrícola.

A argila e o xisto são utilizados no processo de fabricação do cimento, principalmente, para a correção do módulo de alumina, módulo de sílica e no fator de saturação de cal, atuando como um corretor nos teores e, dessa forma, sendo essencial para o processo de fabricação de cimento.

A preparação da área de lavra é realizada por meio de tratores e retroescavadeiras, de modo a remover o capeamento de solo e rochas alteradas. Ao se atingir a camada de rocha o desmonte é realizado com o uso de explosivos. Após o desmonte, o calcário e o estéril são carregados, por retroescavadeira hidráulica, em caminhões basculantes que realizam o transporte do minério até as instalações de beneficiamento e do estéril para o depósito de estéril.

O calcário bruto proveniente das frentes de lavra, constituído por fragmentos grosseiros, é descarregado por basculamento dos caminhões em uma moega acoplada a uma grelha que realiza o corte do material antes de abastecer o britador primário. O material passante é enviado para o depósito de estéril, enquanto o produto da britagem primária será transportado para as pilhas pulmão de calcário calcítico e calcário dolomítico para posterior britagem secundária (Figura 20).

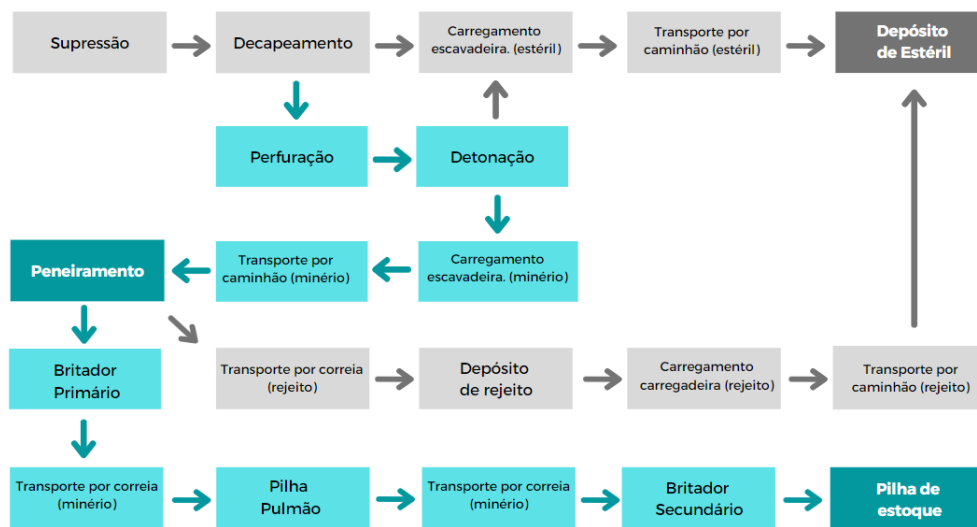


Figura 20: Fluxograma de operação. Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.1. Parâmetros de operação

Os parâmetros geométricos de lavra utilizados na mina são apresentados a seguir:

- ❖ Altura máxima de bancada em talude final: 30 m;
- ❖ Largura da berma: 8 a 10 m;
- ❖ Inclinação máxima do talude em rocha: 80°;

- ❖ Inclinação máxima de talude em argila e solo: 35°;
- ❖ Largura dos acessos: 22 m;
- ❖ Inclinação máxima dos acessos: 10%.

Para o dimensionamento dos equipamentos foi utilizado o pico de produção mensal previsto de 277.000 t/mês. Foram considerados 2 (dois) turnos de trabalho de 8 horas em uma média de 26 dias úteis por mês. O período de turno não programado, estrategicamente definido durante o horário sazonal <sup>[2]</sup>, deve ser utilizado para inspeções e manutenções, a fim de garantir o pleno funcionamento dos equipamentos de carga, transporte e britagem, durante os horários produtivos.

Calculou-se durante a execução do Plano Integrado de Aproveitamento Econômico (PIAE) a quantidade de equipamentos necessários para cada operação e os resultados estão apresentados na (Tabela 1).

Tabela 1: Produtividade mensal e número de equipamentos necessários por atividade.

<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>Produtividade mensal</b>	<b>Quant. equip. necessários</b>
Retroescavadeiras	244.408 (t)	1,13
Caminhões Basculante	47.002 (t)	5,9
Perfuratrizes	1,08 (horas/furo)	1,1

Fonte: PIAE (Interno ao empreendimento).

Portanto, arredondando ao inteiro acima, os cálculos mostraram a necessidade dos seguintes equipamentos: 2 (duas) perfuratrizes, 2 (duas) escavadeiras hidráulicas e 6 (seis) caminhões basculantes. Na mina, objeto de estudo, optou-se pela terceirização da remoção de estéril e lavra de argila, mas quando necessário, equipamentos e funcionários terceiros também são envolvidos na lavra de calcário.

Dentre os equipamentos de perfuração presentes na mina, apresentados na (Tabela 2), o modelo SANDVIK DX – 680 (Figura 21) é destinado à perfuração de furos de bancada. Já o modelo PWH – 5000 (Figura 22) é utilizado nos furos de desenvolvimento, operando na perfuração de bancadas de produção apenas quando o modelo DX-680 se encontra indisponível.

<sup>2</sup> Horário Sazonal é o espaço de três horas consecutivas nos dias úteis – durante o horário de pico– em que o consumidor paga uma tarifa maior na sua conta de energia elétrica em virtude do aumento de consumo neste período.

Tabela 2: Equipamentos de perfuração.

Modelo	Taxa de perfuração
1x SANDVIK DX - 680	35 m/h (aprox.)
1x PW PWH - 5000	20 m/h (aprox.)

Fonte: Autoria Própria



Figura 21: Perfuratriz SANDVIK DX 680. Fonte: Autoria Própria.

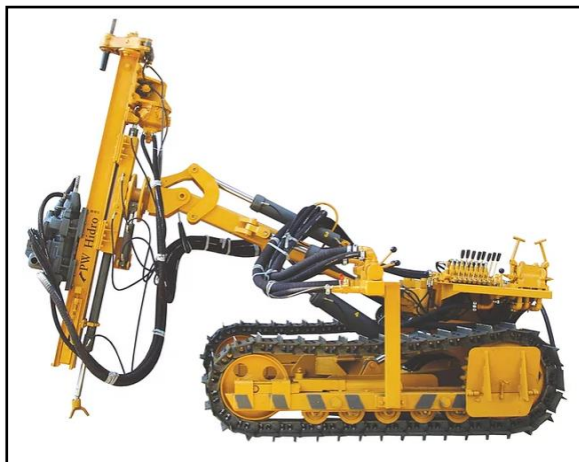


Figura 22: Carreta de Perfuração PW PWH-5000. Fonte: PWHidro, (2021)

Dentre os equipamentos de carregamento disponíveis na mina, apresentados na (Tabela 3), os modelos LIEBHERR (Figura 23) pertencem e são operados pela própria empresa, enquanto os modelos KOMATSU (Figura 24) pertencem e são operados por terceiros.



Tabela 3: Equipamentos de carregamento, próprios e terceiros.

Modelo	Capacidade da caçamba
1x Retroescavadeira Hidráulica LIEBHERR R 954 SME	3.7 m <sup>3</sup>
1x Retroescavadeira Hidráulica LIEBHERR R 954 C	3.3 m <sup>3</sup>
1x Retroescavadeira Hidráulica KOMATSU LC 350-8	2.7 m <sup>3</sup>
2x Retroescavadeira Hidráulica KOMATSU LC 210-10	1.5 m <sup>3</sup>
2x Retroescavadeira Hidráulica KOMATSU LC 200-6B	1.2 m <sup>3</sup>

Fonte: Autoria Própria.



Figura 23: Retroescavadeira Hidráulica LIEBHERR R 954 SME. Fonte: Autoria própria.



Figura 24: Retroescavadeira Hidráulica KOMATSU 350. Fonte: Autoria própria.

Dentre os equipamentos de transporte disponíveis na mina, apresentados na (Tabela 4), os modelos VOLVO (Figura 25) e SCANIA pertencem e são operados pela própria empresa,

enquanto os modelos MERCEDES (Figura 26) e VOLKSWAGEN pertencem e são operados por terceiros.

Tabela 4: Equipamentos de transporte próprios e terceiros.

Modelo	Capacidade da caçamba
2x VOLVO FM 500 8x4R	20 m <sup>3</sup>
4x SCANIA G480 8x4	20 m <sup>3</sup>
3x MERCEDES AXOR 3344 6x4 (auxiliar)	16 m <sup>3</sup>
3x VOLKSWAGEN C. 31-320 6x4 (auxiliar)	16 m <sup>3</sup>

Fonte: Autoria própria



Figura 25: Caminhão Basculante VOLVO FM 8x4R. Fonte: Autoria própria.



Figura 26: Caminhão Basculante MERCEDES AXOR 3340. Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.2. Situação problema

Minerações de pequeno porte, com orçamentos de manutenção enxutos, nem sempre dispõem de todos os recursos necessários para realizar as manutenções preditivas, buscando evitar sinistros, podendo ter as suas capacidades produtivas prejudicadas pela baixa disponibilidade física dos equipamentos, principalmente diante de grandes falhas mecânicas.

Não sendo uma exceção à regra, a mina objeto de estudo passou por grandes baixas em seus equipamentos, tais como, a perfuratriz DX - 680, devido uma falha crítica no motor, e a retroescavadeira 954 C, devido uma falha no sistema rodante, estiveram indisponíveis para operação, por um período aproximado de seis meses.

Como alternativa viável a curto prazo, para a perfuração, foi necessário locar outra perfuratriz de mesmo modelo, já para o carregamento foi preciso utilizar as retroescavadeiras terceiras (que atuam na remoção de estéril) para o carregamento de minério. Neste trabalho, consideraram-se de grande porte as retroescavadeiras LIEBHERR e pequeno porte as retroescavadeiras KOMATSU. Esta classificação será utilizada durante todo o trabalho no intuito de simplificar a apresentação e o entendimento dos dados.

Momentos nos quais dois ou mais equipamentos de transporte estejam indisponíveis para operação, seja para inspeção, manutenção preditiva ou corretiva, geram grande impacto na produtividade global da frota, e como medida mitigadora, os caminhões terceiros (que atuam na remoção de estéril) são inseridos no transporte de minério.

Estes momentos tornaram-se recorrentes devido ao aumento de manutenções incidentais oriundas de falhas na báscula e problemas diversos nos componentes rodantes (pneus). Neste trabalho, consideraram-se de grande porte os caminhões VOLVO e SCANIA de 20m<sup>3</sup> e de pequeno porte os caminhões MERCEDES e VOLKSWAGEN com caçamba de 16 m<sup>3</sup>, aqueles pertencentes a empresa terceira, que normalmente atua na remoção de estéril. Esta classificação será utilizada durante todo o trabalho no intuito de simplificar a apresentação e o entendimento dos dados. São destinados 3 equipamentos de transporte para cada equipamento de carregamento, situação mantida mesmo durante a utilização das diferentes retroescavadeiras disponíveis.

Durante o primeiro trimestre de 2021 foi observada a baixa produtividade do britador primário em relação a sua produção nominal, principal gatilho para este estudo. Os volumes produzidos pelo britador, operando em 2 (dois) turnos, eram insuficientes para atender à meta de produção mensal de 277.000 toneladas/mês, forçando a operação a trabalhar em 3 (três) turnos objetivando atingir a esta meta.

Devido à falta de operadores próprios, o turno extra só foi possível ao incluir, de maneira fixa, as máquinas e operadores terceiros na lavra de calcário. A operação em três turnos não obteve o resultado esperado, uma vez que dificilmente atingia-se a meta de produção, além de implicar em maiores custos operacionais.

Com objetivo de analisar esta queda do indicador, foram elaborados gráficos de Pareto (Gráfico 1), mês a mês, buscando identificar as principais causas do problema acima citado. Dentre estas, a falta de material na moega do britador primário obteve significativo destaque.

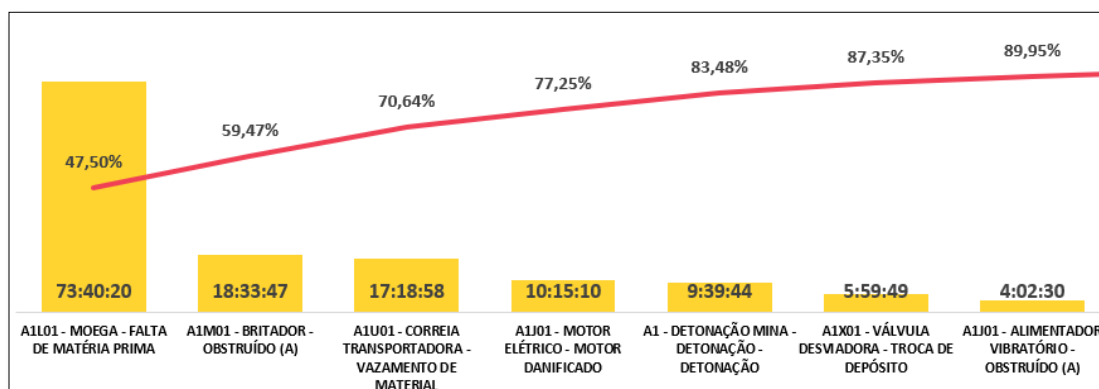


Gráfico 1: Trecho do Pareto de parada do britador primário.

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.3. Relatos em campo e levantamento de hipóteses

O levantamento dos relatos dos operadores foi a primeira forma de entender e identificar as causas da falta de material na alimentação do britador. Os principais relatos foram:

- ❖ Escavadeiras auxiliares possuem concha muito pequena;
- ❖ Escavadeiras auxiliares possuem braço hidráulico curto;
- ❖ Caminhões auxiliares possuem caçamba estreita;
- ❖ Grande tempo de espera em filas no carregamento e transporte;
- ❖ Número elevado de caminhões no ciclo, gerando filas;
- ❖ Muitos matacões;

A partir das observações em campo e da análise do banco de dados referentes à manutenção dos equipamentos, indicadores técnicos e apontamentos, através de metodologias de gestão,

como o Diagrama de Ishikawa<sup>3</sup> (Figura 27), foram definidas as seguintes causas raízes da baixa produtividade do britador primário:

- ❖ carregamento ineficiente ou inadequado;
- ❖ granulometria do minério incompatível com os equipamentos;
- ❖ baixa disponibilidade física dos equipamentos;
- ❖ falta de operador;

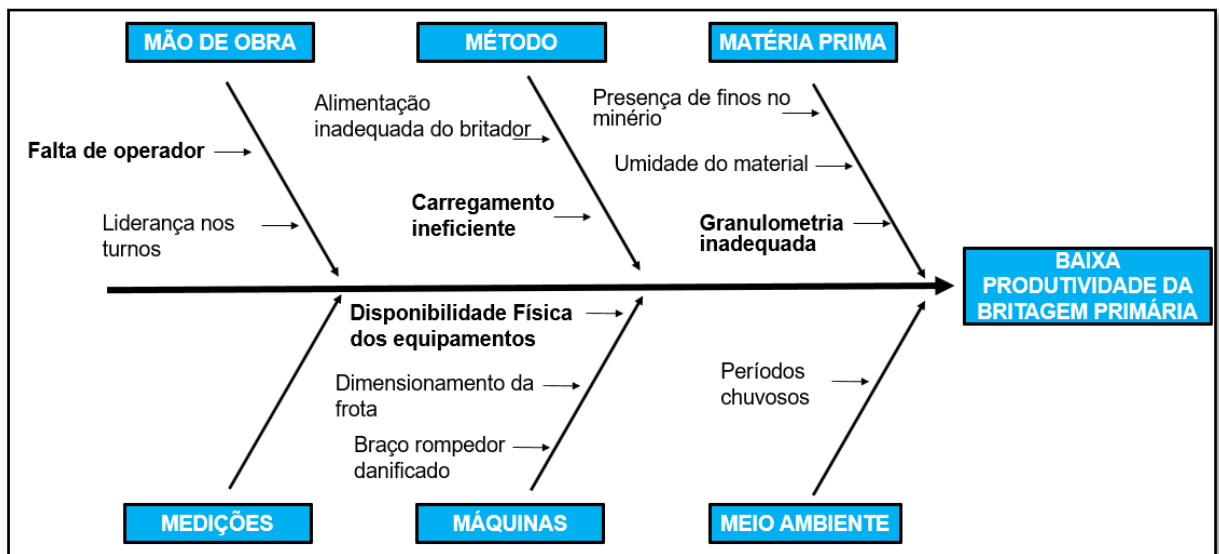


Figura 27 - Diagrama de Ishikawa elaborado durante estudo. Fonte: Autoria própria

#### 4.1.4. Levantamento de hipóteses

Levando-se em consideração os relatos dos operadores e as causas raízes obtidas através das metodologias de gestão, foram levantadas as seguintes hipóteses:

i) A baixa capacidade produtiva das retroscavadeiras terceiras torna, para atender a produção diária, imprescindível manter três ou mais frentes de trabalho, fazendo necessária a alocação de mais veículos de transporte, gerando filas para basculamento no britador (ponto único de descarga) e aumentando os custos de produção;

ii) As dimensões das escavadeiras auxiliares (tamanho da concha e do braço hidráulico) implicam maiores tempos de ciclo no carregamento, devido as dificuldades de enchimento da

<sup>3</sup> Criado na década de 60, o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Espinha de Peixe, é uma ferramenta da qualidade que ajuda a levantar as causas-raízes de um problema, analisando os fatores que envolvem a execução de um processo.

concha. Estes fatores, somados ao número de passes necessários para encher a unidade de transporte, implicam o aumento do tempo de espera em filas para carregamento.

iii) A proporção entre as dimensões da concha da escavadeira de grande porte (LIEBHERR) e a caçamba dos caminhões de pequeno porte (16 m<sup>3</sup>) provoca maiores tempos de ciclo de carregamento;

iv) A heterogeneidade da frota impede que os ciclos de carregamento e transporte entrem em “equilíbrio dinâmico”.

## 4.2. LEVANTAMENTO DE DADOS

Buscando embasamento para as hipóteses criadas, foi feito um minucioso levantamento de dados técnicos, como a capacidades e dimensões dos modelos em operação, e medições em campo dos tempos de ciclos dos equipamentos. Também foi necessário o tratamento dos dados de apontamento, excluindo possíveis erros.

### 4.2.1. Dados de performance

Assim, os dados de performance da britagem primária, gatilho para a análise da eficiência da operação, foram extraídos dos relatórios gerados pelo sistema informatizado de apontamento de produção e gestão de resultados (Figura 28), que compartilha, de forma integrada, os relatórios por meio do software Power BI.

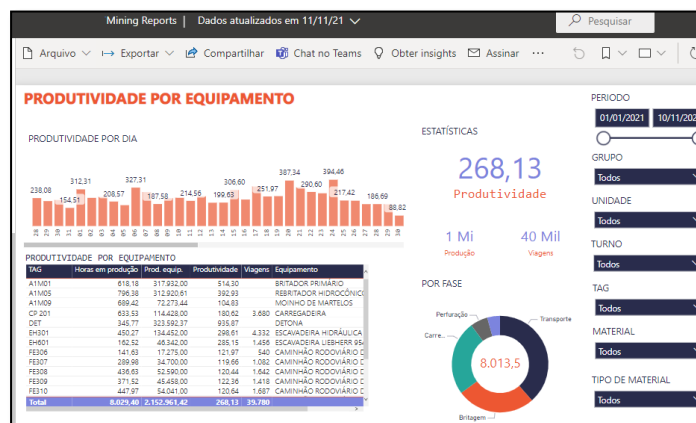


Figura 28: Exemplo de relatório de Produtividade exportado via Power BI. Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.2. Carregamento e transporte

Os parâmetros técnicos utilizados foram obtidos através dos manuais de fabricante (Figura 29 e Figura 30) ou colhidos no próprio equipamento, os demais parâmetros operacionais foram medidos em campo.

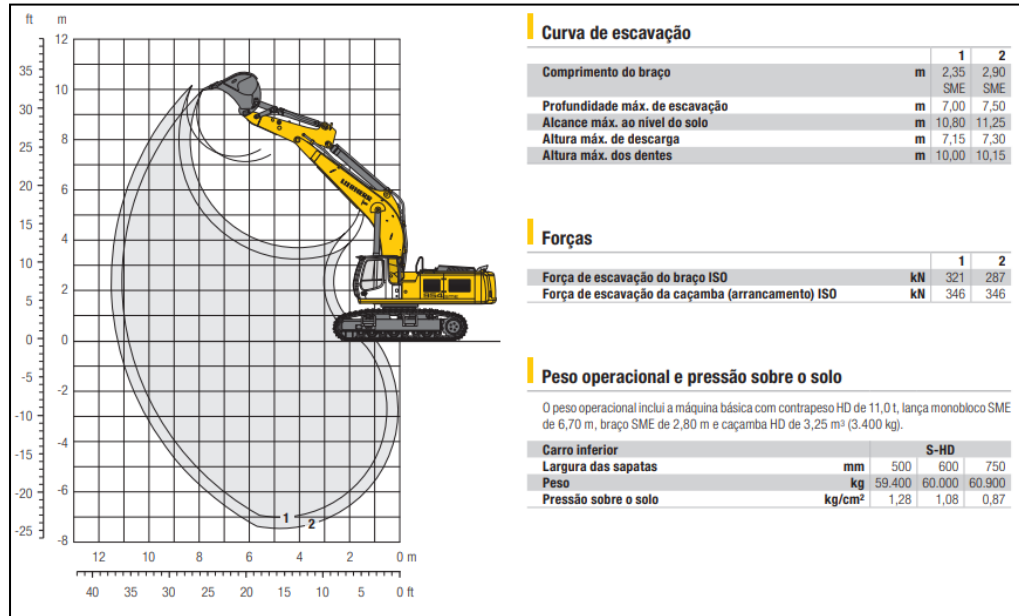


Figura 29: Alcance da escavadeira LIEBHERR R 954 C SME. Fonte: LIEBHERR (2017).

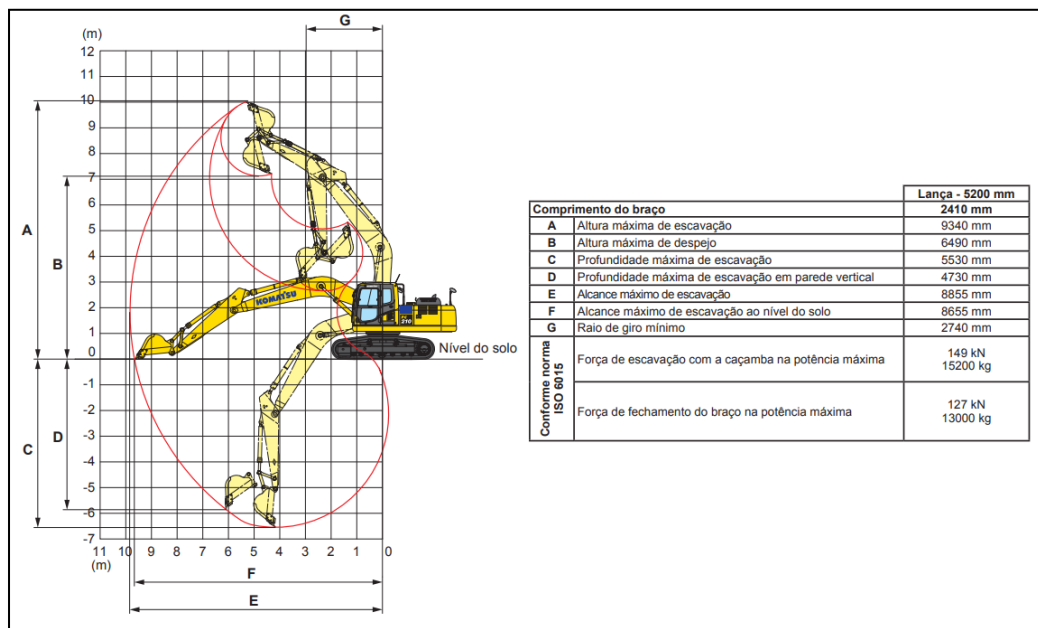
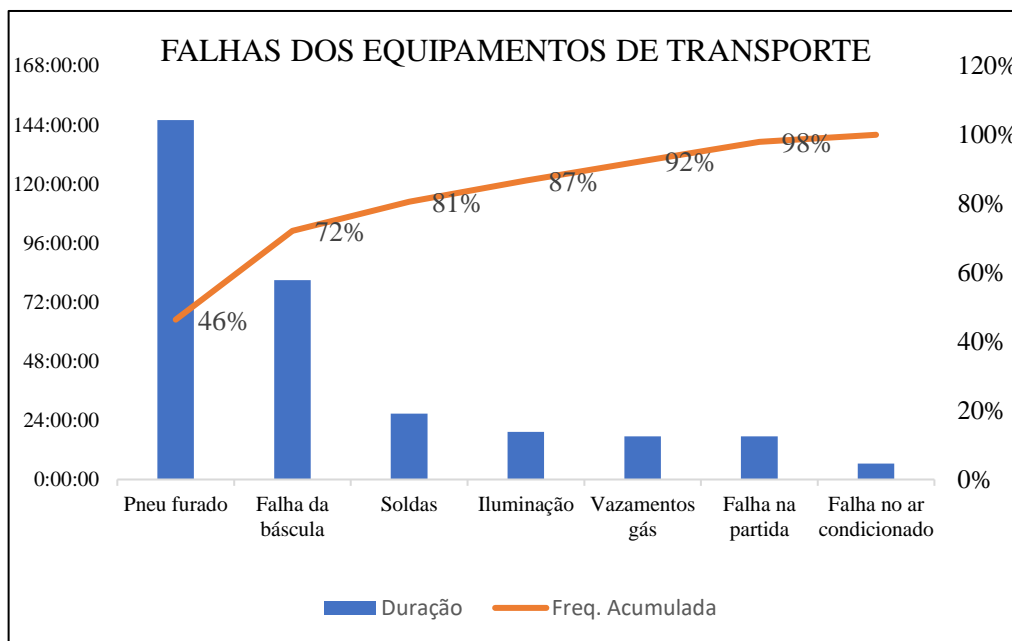


Figura 30: Alcance de trabalho da escavadeira LC 210-10. Fonte: Adaptado de KOMATSU (2021)

Os dados referentes à produção da frota foram obtidos por meio de uma planilha de controle, em Excel e apontados manualmente. Também foi feito o levantamento das falhas ocorridas nos equipamentos de transporte para elaboração de Gráficos de Pareto (Gráfico 2), buscando identificar as relações de causa e efeito que pudessem relacionar a heterogeneidade da frota com o aumento de manutenções corretivas.



Gráfico 2: Pareto das falhas dos veículos de transporte. Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.3. Mediuo dos tempos

A empresa não conta com um sistema de despacho eletrônico que aponta os tempos de ciclo dos equipamentos em operao automaticamente, sendo necessária a amostragem manual destes. Com intuito de analisar o impacto da heterogeneidade da frota nos diferentes *layouts* de operao, alguns pré-requisitos foram fixados no levantamento destes dados:

i) frente de trabalho: a amostragem, para aferir o sistema de desmonte, foi realizada nas mesmas frentes de trabalho (face norte) com a mesma malha de perfurao e conseqüentemente, condições semelhantes de granulometria, densidade e tipo do minério (calcítico);

ii) condições climáticas: a amostragem se restringiu apenas a períodos de seca, não gerando variações devido  umidade das vias, ou ao tamanho das praças de manobra ou, até mesmo com relação ao material;



iii) percurso: a amostragem se restringiu ao mesmo percurso dos equipamentos de transporte, mantendo a DMT com baixíssima variação, bem como a velocidade dos caminhões suscetíveis as mesmas condições da via;

iv) padronização: todas as amostras seguiram o padrão operacional (interno ao empreendimento) de medição de ciclo, onde é bem definido o ponto de início e término de cada etapa do ciclo.

Fixados estes requisitos, quaisquer outros parâmetros, como por exemplo o operador do equipamento ou a hora do dia, foram tomados aleatoriamente. Foram feitas 585 amostragens, buscando garantir a representatividade dos dados.

#### 4.2.3.1. Tempo de ciclo das escavadeiras

Os tempos de ciclo das escavadeiras foram medidos por porte do veículo de transporte (grande ou pequeno) nos diferentes layouts de carregamento/transporte e os dados obtidos são exibidos na (Tabela 5).

Tabela 5: Tempo de ciclo das escavadeiras por porte dos caminhões.

<b>CARREGAMENTO</b>	<b>TRANSPORTE</b>	<b>Tempo médio total de carregamento (mm:ss)</b>	<b>Tempo médio por ciclo (mm:ss)</b>	<b>Número médio de ciclos</b>
<b>R954 SME</b>	Grande porte	03:40	00:25	8,7
	Pequeno porte	03:02	00:25	6,4
<b>R954 C</b>	Grande porte	04:02	00:24	10,2
	Pequeno porte	02:49	00:23	7,3
<b>KOMATSU 350 (auxiliar)</b>	Grande porte	04:36	00:26	11,2
	Pequeno porte	04:32	00:28	9,1
<b>KOMATSU 210 (auxiliar)</b>	Grande porte	07:32	00:27	17,5
	Pequeno porte	06:39	00:28	14,2
<b>KOMATSU 200 (auxiliar)</b>	Grande porte	08:11	00:33	19,1
	Pequeno porte	08:03	00:31	16,8

Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.3.2. Tempo de ciclo dos caminhões

Os tempos de ciclos dos caminhões foram medidos por porte da unidade de carregamento nos diferentes *layouts* de carregamento/transporte, e as médias obtidas são exibidas na (Tabela 6).

Tabela 6: Tempo de ciclo médio dos caminhões por porte da escavadeira

<b>TRANSPORTE</b>	<b>CARREGAMENTO</b>	<b>Tempo de ciclo</b>	<b>Fila para carga</b>	<b>Fila para descarga</b>
<b>20m<sup>3</sup></b>	Grande porte	14:20	00:31	01:09
	Pequeno porte	18:04	04:43	00:23
<b>16m<sup>3</sup></b>	Grande porte	13:31	00:52	00:45
	Pequeno porte	22:53	07:51	02:47

. Fonte: Autoria própria

Observou-se que os tempos de deslocamento e manobras para carga e descarga se mantêm praticamente constantes. A variação dos tempos de ciclo deve-se principalmente aos tempos de carregamento e tempos de espera em filas.

#### 4.2.4. *Outliers*

Eventualmente, durante o descarregamento dos caminhões, o alimentador do britador primário é interrompido devido às condições operacionais ou mecânicas, como arco mecânico e arco coesivo, descritos por SILVA (2020), ou desarme da correia transportadora pelo vigia de tensão. Em função destas paradas, as medições dos tempos de ciclo dos equipamentos são comprometidas, portanto amostras obtidas logo após a falha foram descartadas pois representam outliers decorrentes de condições reais de trabalho, porém que se devem a fatores não intrínsecos às variáveis em análise.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentada a análise completa de toda a frota da empresa em estudo, desde seu dimensionamento, até os resultados operacionais medidos e analisados, realizando comparativos entre as produtividades teóricas elaboradas no PIAE, entre as produtividades teóricas propostas e as produtividades práticas. Também são apresentadas as medidas gerenciais tomadas, buscando alavancar os indicadores de performance dos equipamentos da mina.

### 5.1. DIMENSIONAMENTO E COMPATIBILIDADE

Revisando as memórias de cálculo do dimensionamento dos equipamentos de carregamento e transporte executado na elaboração do PIAE, presentes no ANEXO A, observou-se que nestes planejamentos não foram considerados: o fator de operação conjugada, a eficiência, a disponibilidade física e a utilização, tanto dos equipamentos de carga, quanto dos equipamentos de transporte. Naquele dimensionamento adotou-se um fator de disponibilidade horária dos equipamentos e nenhuma informação ou referência sobre este fator foi encontrada em todo o plano.

Neste mesmo dimensionamento foram adotados volumes de caçambas e tempos de ciclo como valores fixos, mas conforme análise aqui efetuada, há equipamentos com capacidades e ciclos diferentes entre si, necessitando do cálculo de produtividade para cada um, bem como avaliar a quantidade de caminhões de cada porte necessários em cada *layout* de alocação estática.

Outro ponto crítico observado foi o tempo de ciclo de carregamento adotado, sendo 0,25 minutos (15 segundos) um tempo muito curto para realizar um ciclo completo com os equipamentos disponíveis, conforme apresentado na Tabela (7).

Tabela 7: Tempos médios de cada etapa do ciclo de carregamento das escavadeiras LIEBHERR.

ETAPA	ENCHIMENTO	GIRO CHEIO	DESCARGA	GIRO VAZIO
DURAÇÃO (S)	11,84	4,44	3,94	4,77

Fonte: Autoria própria.

Como proposto, foi realizado o cálculo de produtividade (ANEXO B) dos diversos equipamentos de carregamento e transporte, nos diferentes layouts possíveis, considerando a meta dos KPI's e tempos mínimos de ciclo. Para as retroescavadeiras, os resultados obtidos estão representados na (Tabela 8).

Tabela 8: Produtividade teórica proposta dos equipamentos de carregamento por equipamento.

<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>Vol. (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Produtividade mensal (t/mês)</b>	<b>Quant. equip. necessários</b>
LIEBHERR R 954 C SME	3,7	166.018	1,67
LIEBHERR R 954 C	3,3	148.070	1,87
KOMATSU LC 350-8	2,7	121.148	2,29
KOMATSU LC 210-10	1,5	67.305	4,12
KOMATSU LC 200-6B	1,2	53.844	5,14

Fonte: Autoria própria.

Com base na (Tabela 8) é possível verificar que, durante a indisponibilidade da retroescavadeira LIEBHERR R 954 C SME, é necessário alocar um conjunto de máquinas que, operando em conjunto com a LIEBHERR R 954 C, possibilite atingir a meta de produtividade mensal (277.000), ou seja, pelo menos duas retroescavadeiras KOMATSU LC 210-10, como exemplificado na memória de cálculo:

$$67.305 + 67.305 + 148.070 = 282.680$$

Para suprir a indisponibilidade da retroescavadeira LIEBHERR R 954 C é necessário alocar um conjunto de máquinas que, operando em conjunto com a LIEBHERR R 954 C SME, seja possível atingir a meta de produtividade mensal (277.000), ou seja, pelo menos duas retroescavadeiras KOMATSU, podendo apenas uma ser o modelo KOMATSU LC 200-6B, como exemplificado na memória de cálculo:

$$53.844 + 67.305 + 166.018 = 287.167$$

No caso da indisponibilidade de ambas as retroescavadeiras LIEBHERR, é imprescindível a atuação da retroescavadeira KOMATSU LC 350-8 no carregamento de minério, uma vez que o somatório das produtividades de todas as demais máquinas de pequeno porte disponíveis não supre a necessidade de produção mensal requerida, como demonstrado na memória de cálculo:

$$67.305 * 2 + 53.844 * 2 = 242.296$$

Para os caminhões, os resultados obtidos estão representados na (Tabela 9), onde a última coluna refere-se ao número máximo de caminhões em cada porte de escavadeira, de forma que não gere filas de carregamento.

Tabela 9: Produtividade teórica proposta dos equipamentos de transporte por tamanho da caçamba.

<b>Caçamba de transporte (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Equip. Carga</b>	<b>Produtividade mensal (t/mê)</b>	<b>Quant. equip. necessários</b>	<b>Máx equip. por escavadeira</b>
<b>20</b>	Grande porte	48.898	5,7	3,21
	Pequeno porte	38.765	7,15	2,08
<b>16</b>	Grande porte	41.411	6,69	3,79
	Pequeno porte	39.854	6,95	2,03

Fonte: Autoria própria

Também foi realizado o cálculo da produtividade utilizando valores reais dos indicadores (dados sigilosos) obtidos por meio do levantamento de dados de performance e as médias dos tempos de ciclo reais obtidas em campo. Para as retroescavadeiras, os resultados obtidos são exibidos na (Tabela 10):

Tabela 10: Produtividade das retroescavadeiras em função das horas programadas.

<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>Vol. (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Tempo de ciclo (s)</b>	<b>Produtividade mensal 2 turnos(t)</b>	<b>Produtividade mensal 3 turnos(t)</b>
LIEBHERR R 954 C SME	3,7	25,0	95.024	142.536
LIEBHERR R 954 C	3,3	23,5	90.161	135.241
KOMATSU LC 350-8	2,7	27,0	64.205	96.308
KOMATSU LC 210-10	1,5	27,5	35.021	52.532
KOMATSU LC 200-6B	1,2	32,0	23.347	35.021

Fonte: Autoria própria.

Para os caminhões, os resultados obtidos são exibidos na (Tabela 11):

Tabela 11: Produtividade dos caminhões em função das horas programadas.

Caçamba de transporte (m <sup>3</sup> )	Equip. Carga	Tempo de ciclo (mm:ss)	Produtividade mensal 2 turnos(t)	Produtividade mensal 3 turnos(t)
<b>20</b>	Grande porte	14:20	23.542	35.313
	Pequeno porte	18:04	18.677	28.016
<b>16</b>	Grande porte	13:31	19.971	29.957
	Pequeno porte	22:53	11.797	17.695

Fonte: Autoria própria.

Analisando a (Tabela 11) é possível perceber que, devido ao alto tempo de ciclo e aos valores reais dos indicadores de performance, a meta de produção mensal não é atingível ao utilizar apenas os equipamentos próprios, uma vez que, mesmo operando em 3 turnos, não é possível alcançar o pico de 277.000 toneladas por mês, como podemos ver na memória de cálculo abaixo:

$$35.313 * 6 = 211.876$$

A compatibilidade entre os equipamentos de carregamento e transporte também foi revisada, conforme a literatura, buscando encontrar inconsistências que promovem a não otimização das operações na mina objeto de estudo, principalmente relacionadas às dimensões das caçambas das unidades de carregamento em comparação com as unidades de transporte.

Conforme a carta de compatibilidade elaborada por PADAN (1960), os diferentes modelos de escavadeiras, que possuem dimensões de caçambas muito diferentes entre si, são compatíveis com diferentes portes de veículos de transporte, evidenciando a não compatibilidade ao utilizar as escavadeiras KOMATSU 200 e KOMATSU 210 em operação conjugada com os veículos de transporte presentes na mina. (Figura 31).

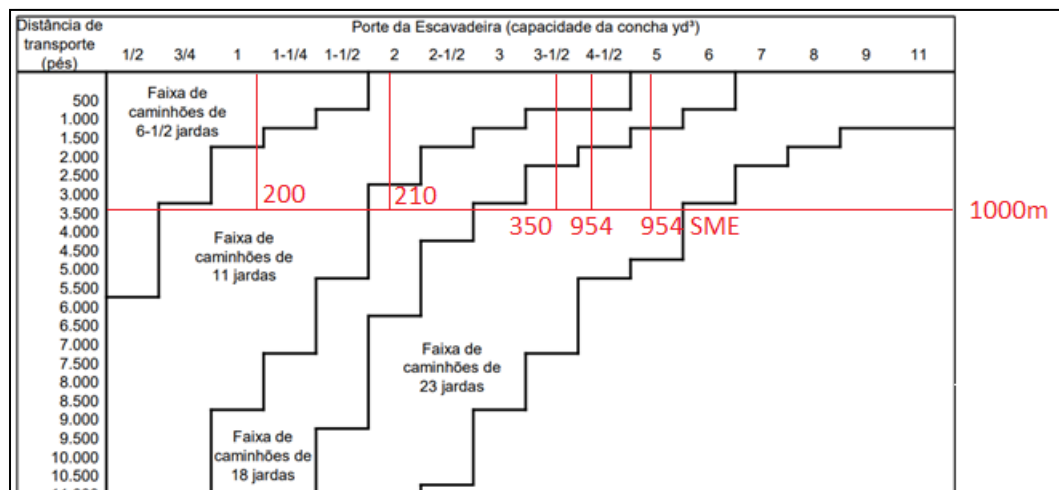


Figura 31: Evidência da incompatibilidade das retroescavadeiras KOMATSU 200 e 210 com os caminhões disponíveis. Fonte: Adaptado de PADAN (1960).

Conforme afirma PERONI (2015) em relação ao número de ciclos de carregamento para completar a carga de uma unidade transportadora, é possível observar na frota da mina objeto deste trabalho a incompatibilidade do porte dos equipamentos, uma vez que a média do número de ciclos de carregamento é superior ao máximo definido pelo autor (em vermelho) na maioria dos layouts de operação, conforme apresentado na (Tabela 12). Esta incompatibilidade se agrava durante a utilização das retroescavadeiras de pequeno porte, tornando a operação extremamente ineficiente.

Tabela 12: Número de ciclos necessários para o carregamento de um caminhão.

	TRANSPORTE	Número de ciclos		
		teórico	prático	
CARREGAMENTO	R954 SME	Grande porte	5,4	8,7
		Pequeno porte	4,3	6,4
	R954 C	Grande porte	6,1	10,2
		Pequeno porte	4,8	7,3
	KOMATSU 350 (auxiliar)	Grande porte	7,4	11,3
		Pequeno porte	5,9	9,2
	KOMATSU 210 (auxiliar)	Grande porte	13,3	17,5
		Pequeno porte	10,7	14,2
	KOMATSU 200 (auxiliar)	Grande porte	16,7	19,2
		Pequeno porte	13,3	16,8

Fonte: Autoria própria.

A (Tabela 11) também evidenciou o alto número de ciclos práticos de carregamento, problema atribuído ao desmonte de rochas. Foram realizadas as pesagens da carga dos

caminhões, buscando justificar o alto número de ciclos práticos pelo sobrecarregamento da unidade transportadora, hipótese descartada pela avaliação dos resultados das pesagens. Observou-se durante as pesagens que o fator de enchimento médio da unidade de carregamento é de aproximadamente 0.9, valor utilizado durante a proposta de produtividade teórica elaborada neste trabalho, diferente do previsto no dimensionamento presente no PIAE (0.8).

## 5.2. VALIDAÇÃO DAS HIPÓTESES

### 5.2.1. Hipótese (i)

Analisando os resultados encontrados durante o cálculo das produtividades teóricas propostas dos equipamentos de carregamento por equipamento e na produtividade das retroescavadeiras em função das horas programadas, pode-se validar a hipótese i, que levanta os problemas gerados pela utilização exclusiva de retroescavadeiras de pequeno porte, no qual o pico de produtividade estipulado em projeto (277.000 t/mês) só é atingível ao utilizar pelo menos quatro retroescavadeiras KOMATSU, implicando em um grande número de veículos de transporte e a geração de filas na alimentação do britador primário, conforme a necessidade de veículos por escavadeira demonstrada nos cálculos das produtividades teóricas propostas dos equipamentos de transporte por tamanho da caçamba.

A média do tempo de ciclo das retroescavadeiras de pequeno porte é aproximadamente 20% maior do que dos equipamentos de grande porte, esta diferença aumenta para 24% se considerarmos os extremos, conforme os tempos de ciclos das retroescavadeiras por porte dos caminhões. Do mesmo modo, de acordo com os manuais dos fabricantes, o alcance de trabalho das escavadeiras KOMATSU 210 é aproximadamente 23% menor do que os modelos LIEBHERR, implicando em maior translação destas máquinas de pequeno porte e, portanto, menor eficiência.

### 5.2.2. Hipótese (ii)

A razão do maior tempo de ciclo de carregamento das escavadeiras de pequeno porte pode ser atribuída a diversos fatores, como as condições mecânicas do equipamento, a granulometria do material, o tamanho da bancada etc. Contudo, avaliando os resultados encontrados durante as medições dos tempos de ciclos das escavadeiras, entende-se que a granulometria do minério afeta progressivamente no tempo de carregamento conforme se reduz o porte destes



equipamentos, pois as escavadeiras menores não possuem a potência ideal para lidar com a faixa granulométrica do material a ser carregado, implicando produtividades práticas abaixo do previsto, devido à baixa eficiência causada pelas condições inadequadas de carregamento, como pressupõe a hipótese ii, concordando com as afirmação de BEYGLOU (2016).

### 5.2.3. Hipótese (iii)

Os dados referentes aos ciclos de carregamento em função do porte dos caminhões não indicam um aumento no tempo de carregamento dos caminhões de pequeno porte em relação aos de grande porte, contrariando a hipótese iii. Para entender melhor o que ocorre durante o carregamento (Figura 32), principalmente ao se utilizar a maior retroescavadeira e o menor caminhão, foi necessário avaliar, em campo, o carregamento e medir as dimensões das caçambas dos equipamentos (Figura 33 e 34).



Figura 32: Carregamento transversal. Fonte: Autoria própria



Figura 33: Dimensões da caçamba da retroescavadeira LIEBEHRR R 954 SME. Fonte: Autoria própria

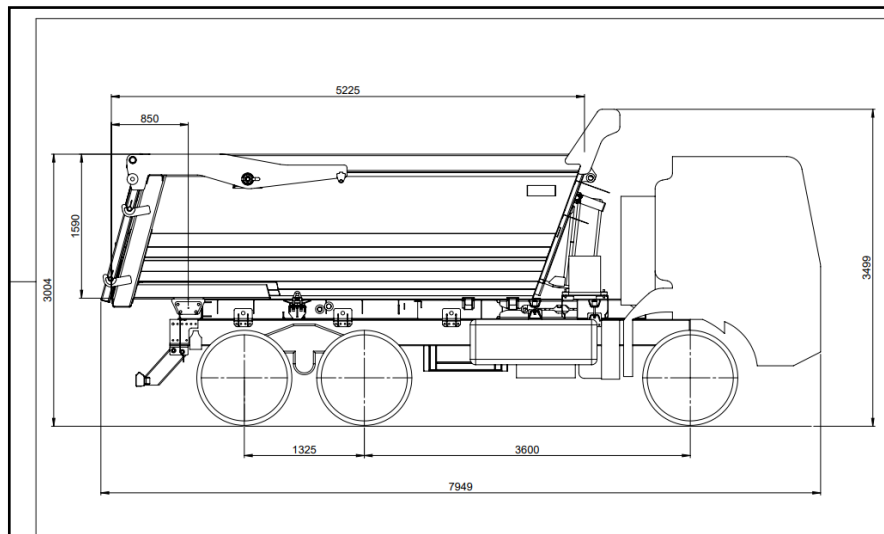


Figura 34: Dimensões da caçamba dos caminhões de pequeno porte.  
 Fonte: INMECO (2015).

Quando o carregamento acontece de maneira ideal (retroescavadeira e caminhões alinhados), a concha da retroescavadeira pode adentrar totalmente à caçamba do caminhão, despejando o material com baixa probabilidade de cair minério sobre a via ou danificar a caçamba do caminhão. No carregamento transversal ou oblíquo, o perfil mais longo da concha da retroescavadeira (comprimento) ataca em direção ao perfil mais curto da caçamba do caminhão (largura), como observado na (Figura 35).

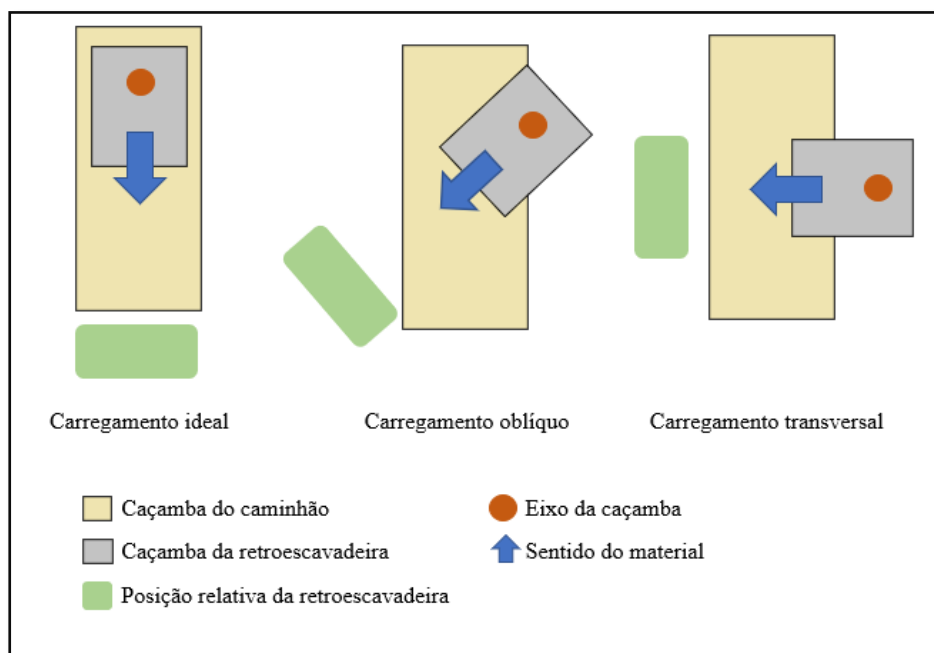


Figura 35: Representação das formas de carregamento. Fonte: Autoria própria

Durante o carregamento dos caminhões de pequeno porte com a retroescavadeira 954 SME, a abertura da caçamba dos caminhões induz o operador a despejar o material sem adentrar à caçamba da unidade transportadora, motivo qual não se têm um aumento do tempo de ciclo dos caminhões de pequeno porte em relação aos de grande porte. Contudo carregando dessa forma, principalmente em condições não ideais de carregamento, existe a maior probabilidade de queda de material, podendo ocorrer avarias na caçamba (Figura 36), bem como incorrer em paradas para limpeza da via, impactando negativamente o indicador de eficiência.



Figura 36: Trincas, soldas e avarias na caçamba do caminhão VW. 31-320.  
Fonte: Autoria própria.

A partir dos dados referentes às manutenções dos veículos de transporte, não foi possível comprovar a relação de causa e efeito, no período no qual houve operações com frota heterogênea com as Falhas Cabeça de Pareto<sup>4</sup> (pneus e báscula). A análise dos dados, por sua vez indicou ascensão do número de eventos e duração média das falhas relacionadas à pneus durante o ano da análise (Gráfico 3).

---

<sup>4</sup> Falhas Cabeça de Pareto: são as falhas apresentadas em um gráfico de Pareto responsáveis pelos maiores tempos de paradas, ou seja, as falhas que mais afetam a disponibilidade física de um equipamento.

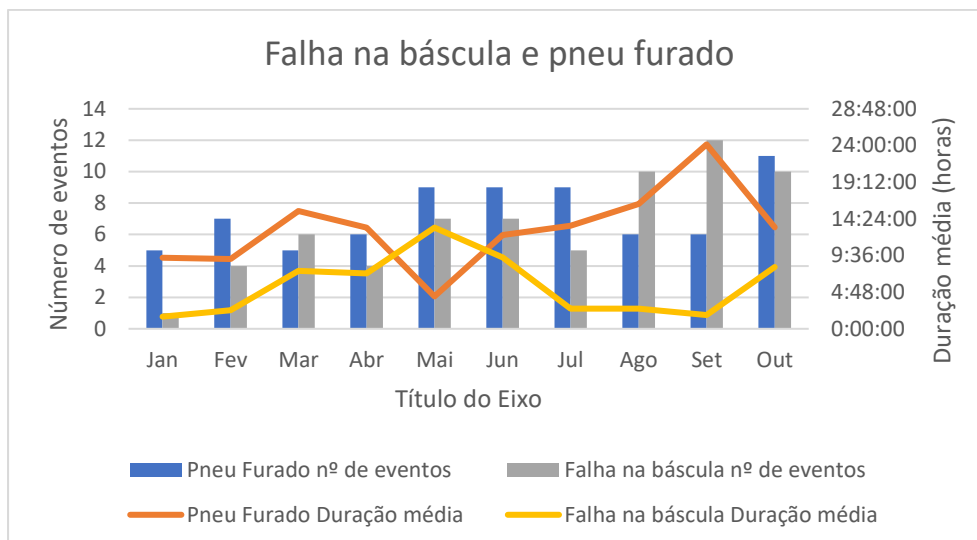


Gráfico 3: Distribuição das principais falhas dos equipamentos de transporte no ano de 2021. Fonte: Autoria própria.

#### 5.2.4. Hipótese (iv)

Os dados levantados no sistema informatizado de apontamento cruzados com os tempos de ciclo colhidos em campo de cada equipamento locado na operação, foram insuficientes para definição da produtividade dos equipamentos de carregamento e transporte em função da heterogeneidade da frota. Contudo, foi possível inferir, baseando-se nos tempos de ciclo de carregamento e transporte e nos resultados que serão apresentados no próximo capítulo, que a produtividade tende a diminuir em função do aumento da heterogeneidade, pois esta favorece a formação do fenômeno de aglomeração, descrito por ASSAKKAF (2003) *apud* DEMBETEMBE (2017, p. 210), e a chegada simultânea de dois caminhões no mesmo instante para a mesma atividade (descarregamento no britador).

Esta hipótese pode ser posta à prova por meio de modelamentos matemáticos de simulação de carregamento e transporte que, alimentados por dados de um sistema de despacho eletrônico, permitem obter a produtividade de cada equipamento, bem como de toda frota, em função do porte de cada equipamento locado em cada frente de trabalho, podendo ser objeto de estudos futuros, uma vez que este tipo de simulação é impraticável em minas sem um sistema de despacho eletrônico, devido à complexidade da coleta de dados.

### 5.3. TOMADAS DE DECISÃO

Baseando-se no estudo aqui realizado, algumas ações foram tomadas, buscando alavancar os indicadores de performance dos equipamentos e otimizar as operações e são destacadas a seguir.

❖ Revisão e reformulação do plano de fogo embasado nas equações apresentadas no capítulo 3.1.3 (ANEXO C), alterando a malha de perfuração, tipo de tamponamento e sequenciamento da detonação, variando-o conforme litologia, planos preferenciais de ruptura, objetivando granulometrias mais adequadas aos equipamentos, conforme apresentado na Figura (37) e na Figura (38).

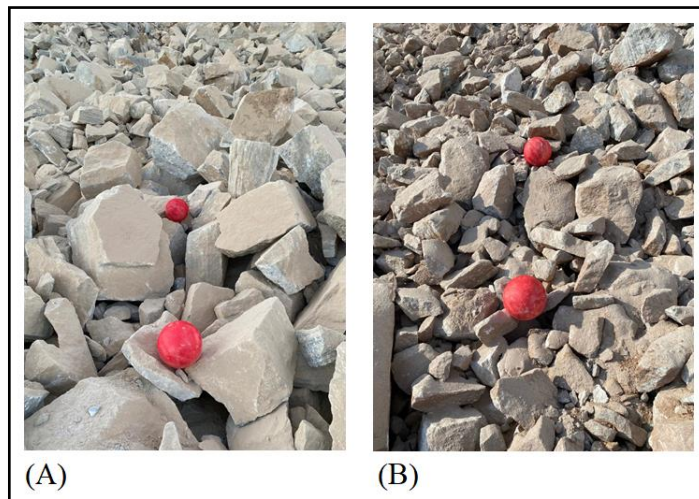


Figura 37: Fotos com esfera de referência para análise granulométrica. (A) Antes da revisão do plano de fogo. (B) Após reelaboração do plano de fogo. Fonte: Autoria Própria.

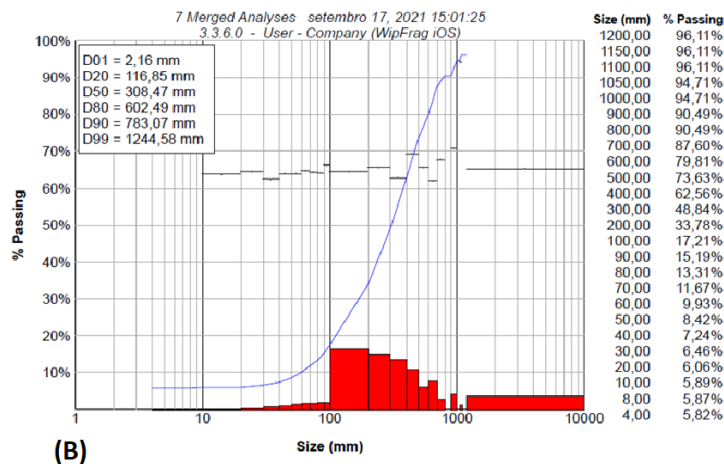


Gráfico 4: Distribuição granulométrica referente à Figura 37 -B. Fonte: Interno ao empreendimento.

Dentre as mudanças realizadas no plano de fogo, a redução do afastamento (2,80m para 2,50) e a troca do material de tamponamento (pó de perfuração para brita) foram as que mais impactaram na redução granulométrica.

Foi realizado um levantamento de dados geotécnicos (Figura 38) buscando o entendimento dos mecanismos de gerações de blocos, da baixa preservação dos taludes e geração de taludes negativos, dos desvios de perfuração e formação de repés, objetivando principalmente condições mais seguras de operação e, conseqüentemente, atividades mais fluidas e eficientes.

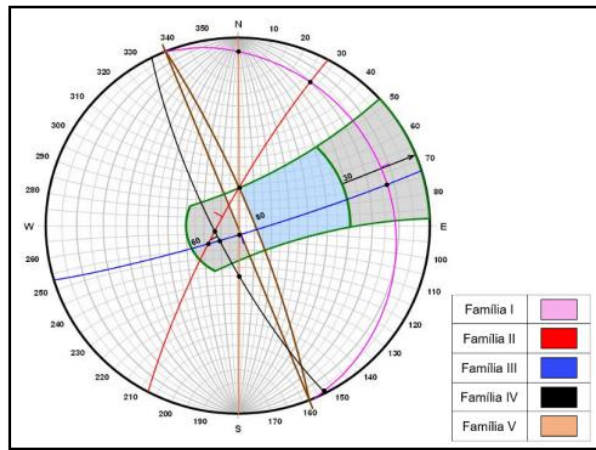


Figura 38: Planos médios de descontinuidade da face oeste da cava.  
Fonte: Relatório Geotécnico interno ao empreendimento.

❖ Locação de uma retroscavadeira modelo Volvo 380D (Figura 39), com maior capacidade produtiva em relação às escavadeiras auxiliares presentes na mina, destinada a suprir a indisponibilidade dos modelos LIEBHERR. Além de maior compatibilidade com os caminhões que os modelos KOMATSU, a locação permite que as retroscavadeiras terceiras atuem em sua atividade fim, pois não serão utilizadas na lavra de calcário;



Figura 39: Retroscavadeira Volvo 380D locada, com caçamba de 3,0 m³. Fonte: Autoria própria.

❖ Durante o levantamento dos indicadores de performance no sistema informatizado de gestão, observou-se que o indicador de Eficiência da frota era o mais baixo dentre todos. Objetivando alavancar este indicador, foram realizadas adequações das frentes de serviço e treinamento da equipe em padrões de operação, reduzindo os tempos de parada durante o carregamento, provenientes de limpezas, e colaborando para um maior fator de enchimento da caçamba das retroescavadeiras. Estas adequações tratam desde a preparação de bancada de trabalho com altura ideal em função do alcance de escavação de cada equipamento, até a remoção prévia de matacos entre turnos, ampliação de praças etc., buscando também evitar situações de carregamento oblíquo ou transversal. Para contemplar as ações acima citadas, alguns operadores foram contratados para trabalhar no período sazonal, desenvolvendo as atividades de adequação e infraestrutura acima citadas.

❖ Retomada da operação de produção em dois turnos, buscando minimizar os gastos operacionais extras de carregamento, de transporte e de britagem, principalmente devido ao elevado custo da energia elétrica no período sazonal e as horas não contratuais pagas a terceiros. Esta retomada também contribui para que a equipe de manutenção possa manter uma programação de manutenções preditivas e corretivas em janelas de oportunidade (turno não programado de produção), otimizando os indicadores de Disponibilidade Física da frota e Utilização do britador, implicando em menor utilização dos equipamentos terceiros, menor custo e uma frota mais compatível entre si.

❖ Reavaliação do número de veículos de transporte necessários para cada unidade de carregamento, baseado na DMT e porte da retroescavadeira, buscando otimizar as operações e reduzir custos, conforme calculado neste trabalho.

❖ Implementação de um plano de inspeção independente (Tabela 13), desassociando-o das manutenções preventivas (as inspeções ocorriam apenas durante as paradas para manutenções preventivas), com periodicidades variando conforme o impacto do equipamento na produção, buscando mapear e corrigir falhas antes do aumento da criticidade destas. Para retroescavadeiras e perfuratrizes, foram definidas inspeções quinzenais, para os caminhões e demais equipamentos foram definidas inspeções mensais.

Tabela 13: Programação semanal da manutenção de máquinas móveis destacando as inspeções.

Ordem	TAG	Texto Breve	Início-base	Horário
151XXXXX	FE307	Preventiva 50h caminhão fora estrada	04/10/2021	17:30 às 18:30
151XXXXX	MN701	Lubrificar motoniveladora	04/10/2021	10:00 às 11:00
151XXXXX	PH002	Lubrificar perfuratriz hidráulica	04/10/2021	11:00 às 12:00
151XXXXX	VR001	Inspeção mensal varredeira	04/10/2021	14:30 às 22:30
151XXXXX	A1G01	Inspeção mensal rompedor hidráulico	05/10/2021	17:30 às 22:30
151XXXXX	CC002	Inspeção quinzenal caminhão comboio	05/10/2021	10:00 às 13:00
151XXXXX	FE308	Preventiva 50h caminhão fora estrada	05/10/2021	17:30 às 18:30
151XXXXX	EP301	Substituir mangueira danificada	06/10/2021	13:00 às 17:00
151XXXXX	FE307	Inspeção mensal caminhão fora de estrada	06/10/2021	14:30 às 22:30
151XXXXX	FE307	Preventiva 250h caminhão fora estrada	06/10/2021	14:30 às 22:30
151XXXXX	FE309	Preventiva 50h caminhão fora estrada	06/10/2021	17:30 às 18:30
151XXXXX	CP301	Inspeção mensal carregadeira de rodas	07/10/2021	07:30 às 17:30
151XXXXX	EH301	Inspeção quinzenal retroescavadeira	07/10/2021	14:30 às 22:30
151XXXXX	FE310	Preventiva 50h caminhão fora estrada	07/10/2021	17:30 às 18:30
151XXXXX	PP002	Inspeção quinzenal perfuratriz	07/10/2021	23:30 às 08:30
151XXXXX	EH601	Inspeção quinzenal retroescavadeira	08/10/2021	14:30 às 22:30
151XXXXX	EH601	Substituir correia do motor e buzina	08/10/2021	14:30 às 22:30
151XXXXX	FE308	Inspeção mensal caminhão fora de estrada	08/10/2021	23:30 às 08:30
151XXXXX	FE311	Preventiva 50h caminhão fora estrada	08/10/2021	17:30 às 18:30
151XXXXX	Y1Y16	Lubrificação Munck Argos - Y1Y16 - S1	08/10/2021	10:00 às 11:00

Fonte: Interno ao empreendimento.

❖ Definição de um responsável da equipe de manutenção para atuar ativamente na manutenção e preservação dos pneus, buscando reduzir o número de falhas e a duração média destas, realizando rodízios e programando recapagens quando necessário.

❖ Substituição das chaves eletromecânicos de fim de curso (A) do cilindro de acionamento da tampa da balsa por sensores indutivos (B), buscando reduzir o número de falhas ao adotar um componente com maior vida útil e maior confiabilidade, devido ao fato de que os sensores indutivos não são suscetíveis a desgaste.

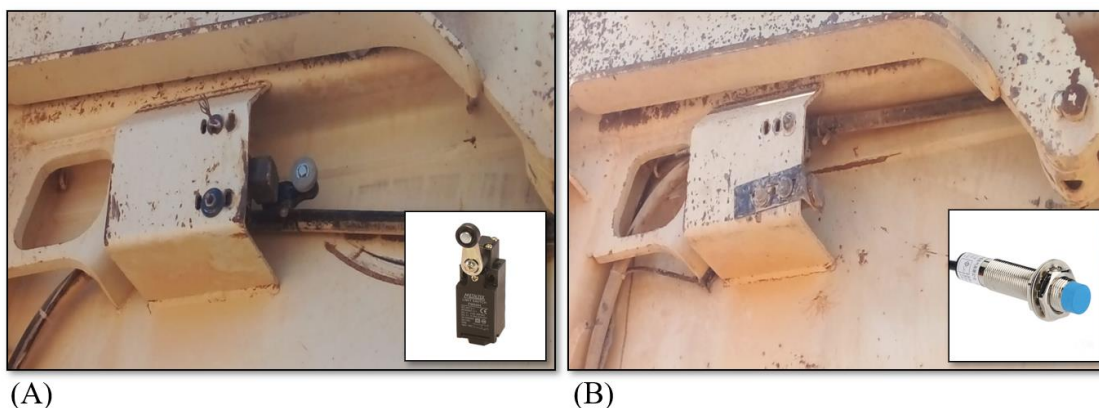


Figura 40: Melhoria implementada no fim de curso do cilindro de acionamento da tampa da balsa. Fonte: Autoria própria



O Gráfico de Pareto referente às principais falhas que ocorrem nos veículos de transporte chamou a atenção sobre um ponto referente à manutenção dos caminhões não relacionados ao objetivo da análise (relação de causa e efeito), mas que indiretamente contribuíram para elevação da disponibilidade de frota. Durante o estudo ficou evidente que as falhas recorrentes estavam relacionadas com a vida útil dos componentes, gerando as duas últimas ações acima citadas.

#### 5.4. RESULTADOS OBTIDOS

Conforme apresentado, a alteração dos parâmetros de perfuração gerou um aumento de 4,8% na frequência acumulada abaixo de 700mm, granulometria máxima adequada tanto para carregamento quanto para alimentação do britador primário, contribuindo para o aumento do Fator de Enchimento das retroescavadeiras em operação e diminuição das paradas por enguiolamento do britador, como prevê o estudo realizado por SILVA (2011).

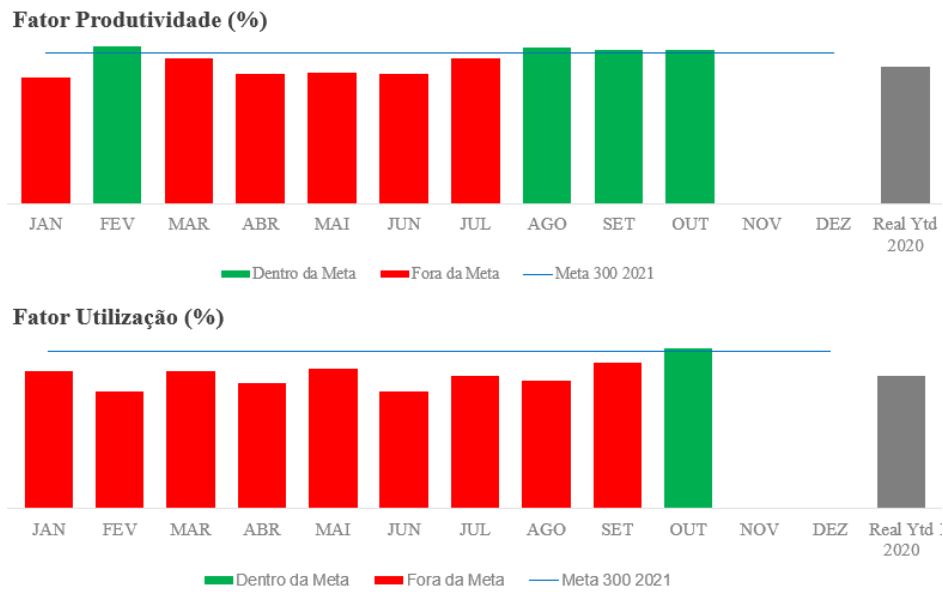
As ações voltadas para aumentar a Disponibilidade Física da frota de carregamento e transporte e, conseqüentemente, aumentar a produtividade, obtiveram o esperado ao conseguir alavancar este indicador, conforme apresentado na (Tabela 14).

Tabela 14: Comparação DF de carregamento e transporte.

	Média Carregamento	Média Transporte
Antes	42,0%	75,9%
Depois	77,6%	89,9%
<b>Aumento</b>	<b>35,6%</b>	<b>14,0%</b>

Fonte: Autoria própria

Por fim, o levantamento dos KPI's do britador indica a relação entre a baixa compatibilidade da frota e eficiência operacional ao utilizar os equipamentos terceiros (janeiro a junho), em comparação com os resultados após as tomadas de decisão (julho a outubro) que contribuíram para a retomada das operações com frota majoritariamente própria. Os resultados mensais em relação a meta dos indicadores são apresentados nos Gráficos (6) e (7), onde, as colunas em verde são os meses que se atingiu a meta estipulada pela empresa.



Gráficos 5 e 6 - Indicadores de performance do britador primário Fonte: Interno ao empreendimento.

Observou-se a variação nos indicadores do britador primário (Tabela 15), associado majoritariamente à redução da falta de material em sua alimentação, resultado do aumento da produtividade das operações conjugadas carregamento – transporte.

Tabela 15: Alavancagem dos KPI's do britador primário. Valores de produtividade em função da capacidade nominal do britador.

	Média Utilização	Média Produtividade
Antes	71,6%	76,9%
Depois	78,6%	85,8%
<b>Ganho</b>	<b>7,0%</b>	<b>8,9%</b>

Fonte: Autoria própria.

## 6. CONCLUSÃO

A experiência dos operadores de máquinas móveis foi de suma importância para identificação dos gargalos na produção. A contribuição destes no levantamento de dados foi imprescindível devido à ausência de um sistema de despacho eletrônico. Portanto treinamentos e orientações diárias sobre apontamentos, no intuito de capacitar os colaboradores a gerar um banco de dados confiável, são necessárias neste modelo de negócio.

Por meio deste estudo foi possível identificar os pontos críticos que influenciam na baixa produtividade da frota. O dimensionamento realizado no PIAE não condiz com os parâmetros do empreendimento, pois tampouco utiliza o volume das caçambas e tempo de ciclo corretos das unidades de carregamento, criando projeções errôneas.

A proporção entre a capacidade das caçambas (caminhão/escavadeira) margeou, conforme a literatura, a compatibilidade ideal entre os equipamentos no que diz respeito ao número de ciclos de carregamento necessários para preencher a unidade de transporte, de tal forma que, salvo em condições específicas de operação, não é possível atingir um patamar satisfatório de produtividade.

Conclui-se também que, qualquer resultado previsto em um projeto de dimensionamento, expansão ou locação, nem sempre é alcançado na prática, devido às condições reais de operação, de tal forma que, um bom planejamento deve adotar medidas que permitam variações em relação as condições ideais, sem comprometer os resultados desejados, como por exemplo dispor de equipamentos reservas.

O dimensionamento e compatibilidade da frota não deve ser executado apenas em novos empreendimentos, mas também para otimização dos recursos internos e externos disponíveis, buscando, como foi executado neste trabalho por exemplo, redefinir a quantidade de caminhões em função da produtividade dos equipamentos de carregamento em operação.

A utilização de equipamentos com portes similares nas diferentes atividades do empreendimento proporciona opções viáveis quando se faz necessário realocar equipamentos nas frentes de trabalho, algo que não foi levado em consideração durante a contratação da empresa terceirizada responsável pela remoção de estéril, principalmente em relação ao porte das retroescavadeiras.

O plano de fogo deve acompanhar as mudanças das variáveis envolvidas em cada detonação, como altura da bancada, presença de falhas ou tipo de minério, embasando-se no conhecimento multidisciplinar já consolidado no meio da mineração e refinando-se conforme

a experiência dos responsáveis pela sua elaboração e necessidade de cada empreendimento, objetivando melhores resultados.

O desconhecimento das capacidades produtivas de todos os equipamentos em operação pode provocar a redução da produtividade destes, devido ao alto índice de desperdícios. Este estudo define as produtividades dos equipamentos em função de suas características particulares, norteando as tomadas de decisão, principalmente relacionadas ao número de veículos de transporte em cada ponto de carregamento durante a alocação estática de caminhões.

Uma mineradora alcançará produtividades anuais satisfatórias quando existir a fluidez de suas atividades unitárias, por isso a compatibilidade entre as máquinas é tão importante. Cada equipamento deve cumprir seu papel de maneira eficaz, e para isso cabem aos gestores optarem por estratégias fundamentadas em estudos teóricos e práticos, objetivando maximizar a produtividade dos equipamentos mediante as particularidades de cada empreendimento. Do mesmo modo, produtividade de uma operação também é afetada pelas condições de trabalho nas quais os equipamentos e operadores estão sujeitos, por isso manter as condições seguras e ajustadas às necessidades geram grande impacto na produtividade e, conseqüentemente, um retorno econômico positivo para a empresa.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSAKKAF, I. **Trucks and Hauling Equipment**. 6 ed. Maryland: Mc Graw Hill, 2003.54 p.

BARBOSA, R. C. **Uso de simulação de eventos discretos para avaliação de desempenho de caminhões autônomos em mineração**. 2020. p. 132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

BASTOS, G. S. Decision making applied to shift change in stochastic open-pit mining truck dispatching. **IFAC Symposium on automation in Mining, Mineral and Metal Processing**, San Diego, USA, v. 16, p. 34 – 39, 2013.

BELAZ. **Catálogo do Fabricante**. Disponível em: [www.belaz.by/en/products/](http://www.belaz.by/en/products/). Acesso em: 10 dez. 2021.

BEYGLOU, A. **On the Operational Efficiency in Open Pit Mines**. **Mining and Rock Engineering**. 2016. p. 60. Tese (Licenciatura em Engenharia Civil) Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, University of Technology, Luleå, Sweden, 2016.

BORGES, T. C. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração**. 2013. p. 103. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

BRANDI, I. V. **Estudo da efetividade dos planos de recuperação de áreas degradadas (PRADs) de atividade de exploração de minério de ferro na região do quadrilátero ferrífero - MG**. 1994. p. 114. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

BRASIL. Ministério Do Trabalho e Previdência. **NR 22 - Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Governo Federal, 1978. p. 58. Última modificação: Portaria SEPTR 210/2019)

CAVADAS, P. M. M. **Optimização do desmonte numa mina a céu aberto com aplicação de air decks**. 2012. p. 172. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-ambiente) –

Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

COUTINHO, H.L. **Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto**. 2017. p. 94. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola De Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CSEM. **Mineração 4.0: IoT em esteiras inteligentes para transporte de minério**. 2020. Disponível em: [www.csembrasil.com.br/en/mineracao-4-0-iot-em-esteiras-inteligentes-para-transporte-de-minerio/](http://www.csembrasil.com.br/en/mineracao-4-0-iot-em-esteiras-inteligentes-para-transporte-de-minerio/). Acesso em: 10 dez. 2021.

CURI, A. **Minas a céu aberto: Planejamento de lavra**. 1ª Edição. Oficina de Textos. 2014. p. 223. ISBN: 978-85-7975-149-3

DEMBETEMBE, G. G. **Nchanga Open Pit Fleet Optimization for Productivity Improvement**. 2017. p. 96. Tese (Mestrado em Ciência Mineral) – University of Zambia, Lusaka, Zâmbia, 2017.

ERCELEBI, S. G.; BASCETIN, A. Optimization of shovel-truck system. **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 109, n.7, p. 433-439, July 2009.

HARTMAN, H. L. **SME Mining Engineering Handbook**. 2ª Edição. Colorado: Editora Littleton, v. 1, 1992, p. 2394. ISBN-10: 0873351002.

HARTMAN, H.L.; MUTMASKY, J.M. **Introductory Mining Engineering**. 2ª Edição. New Delhi: Editado por Jhon Wiley & Sons, 2002, p. 592. ISBN: 978-0-471-34851-1.

HASUI, Y; CARNEIRO, C. D R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELI, A. **Geologia do Brasil**. 1ª. Edição. São Paulo: Editora Beca, 2013. p. 900. ISBN ISBN 987-85-62768-10-1.

IRAMINA, W, S. Introdução à Engenharia Aplicada a Industria Mineral. **Desmonte de rochas por explosivos – notas de aula**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015, p. 38.

JARDIM, T.F. **Análise de Desempenho de Brocas Triconicas 9 7/8"**. 2017. p. 39. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

JIMENO, L. J. *et al.* **Manual de perforacion y voladura de rocas**. 2ª Edição. Madri: Instituto Geologico y Minero de España, 2004, p. 442. ISBN: 84-505-70007-7

KIM, D. J.; KIM, J.; LEE, B.; SHIN, M. S.; OH, J. Y.; CHO, J. W.; SONG, C.. Prediction Model of Drilling Performance for Percussive Rock Drilling Tool. **Advances in Civil Engineering**. Hindawi. v. 2020. p. 1-13, 2020.

KOMATSU. **Manual da Escavadeira Hidráulica LC 210 - 10**. Disponível em: <https://www.komatsu.com.br/uploads/produtos/catalogo/ff9d7363fa.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2021.

KOPPE, J. C.; COSTA, J. F. C. L. Operações de lavra em pedreiras. In: CETEM/MCTI **Manual de agregados para a construção civil**. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2012. Cap.7. p.127-145.

LIEHBERR. **Manual da Escavadeira Hidráulica R 954 C SME**. Disponível em: [www.liebherr.com/external/products/products-assets/308323/R954CSME-StageIIIA-BR-PI-2017-10.pdf](http://www.liebherr.com/external/products/products-assets/308323/R954CSME-StageIIIA-BR-PI-2017-10.pdf). Acesso em: 10 dez. 2021.

LOPES, J. R. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com uso de sistema de britagem móvel "In Pit" auto propelido**. 2010. p. 90. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

MENA, R.; ZIO, E.; KRISTJANPOLLER, F.; ARATA, A. Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. **International Journal of Mining Science and Technology**. v. 23. p. 113-119. 2013.

MOREIRA, F. N. **Dimensionamento de frota de transporte e carregamento para as operações unitárias de uma mina em expansão.** 2018. p. 51. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

OLIVEIRA, D. B. M. **Projeto de Melhoria de Fragmentação em Desmonte de Rochas.** 2017. p. 133. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Ouro Preto, 2017.

PADAN, J. W. **Optimum Combination of Truck and Shovel Size for Open Pit Mining.** 1960. p. 86. Thesis (Master of Science) – Department of Mining Engineering, University of Arizona, Arizona, 1960.

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 lógica nebulosa, visando ao atendimento simultâneo de políticas excludentes.** 2007. p. 108. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

PWHIDRO. **Catálogo do Fabricante.** Disponível em [www.pwhidro.com.br](http://www.pwhidro.com.br). Acesso em: 10 dez. 2021.

QUAGLIO, O. A. **Otimização da perfuração e da segurança nos desmontes de agregados através dos sistemas Laser Profile e Boretrak.** 2003. p. 153. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

QUEVEDO, J. M. G. **Modelo de Simulação Para o Sistema de Carregamento e Transporte em Mina a Céu Aberto.** 2009. p. 133. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Industrial, PUC, Rio de Janeiro. 2009.



QUIQUIA, G. W. M. **Mejoramiento continuo en la gestión del ciclo de acarreo de camiones en minería a tajo abierto en Antamina, Cerro Verde, Toquepala, Cujone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapacay y Pucamarca.** 2015. p. 144. Tese (Mestrado em Ciências e Gestão Mineira) – Facultad de Ingeniería Geológica, Minera Y Metalúrgica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2015.

RENDERHUB. Catálogo de Modelos 3D. – Komatsu WA 900, 2021. Disponível em: [www.renderhub.com/arqart/wheel-loader-komatsu-wa900](http://www.renderhub.com/arqart/wheel-loader-komatsu-wa900). Acesso em: 10 dez. 2021.

RENDERHUB. Catálogo de Modelos 3D. – CAT 8200, 2021. Disponível em: [www.renderhub.com/3dstudio/cat-8200-dragline](http://www.renderhub.com/3dstudio/cat-8200-dragline). Acesso em: 10 dez. 2021.

RENDERHUB. Catálogo de Modelos 3D. – Komatsu PC 8000, 2021. Disponível em: [www.renderhub.com/arqart/komatsu-pc8000-shovel](http://www.renderhub.com/arqart/komatsu-pc8000-shovel). Acesso em: 10 dez. 2021.

REVUELTA, M. B.; JIMENO, C. L. **Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones.** Madrid: Editora Entorno Gráfico, 1997. 632p.

RICARDO, H. S. e CATALANI, G. **Manual prático de escavação: Terraplenagem e escavação de rocha.** 3ª Edição. São Paulo: Editora PINI, 2007. p. 656.

RODRIGUES, L. F. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto.** 2006. p. 81. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RUNGE, I. **Mining Economics and Strategy.** 1ª Edição. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 1988. p. 316. ISBN-10: 0873351657.

SANTOS, J. A. G. **Especialização em Mineração e Meio Ambiente: Recuperação e Reabilitação de Áreas degradadas pela Mineração.** 1ª Edição. Cruz das Almas: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2017. p. 44. ISBN: 978-85-5971-037-3.

SILVA, J. M. 2020. **MIN742- Fluxo de Material Fragmentado**. PPGEM. UFOP.  
Disponível em: [ppgem.em.ufop.br](http://ppgem.em.ufop.br)

SILVA, R. C. **Aplicação da padronização da carga média de transporte de minério como iniciativa de incremento de produtividade e redução de custos**. 2016. p. 51. Monografia (Especialista em Geologia de Minas e Técnicas de Lavra a Céu Aberto) – Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

SILVA, V. C. **Carregamento e transporte de rochas**. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2011. p. 17.

SILVA, V. C. **Operações mineiras**. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2009. p. 190.

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

SOUSA JÚNIOR, W.T. **Seleção de caminhões rodoviários para mineração utilizando a Metodologia de Auxílio Multicritério à Decisão: Estudo de caso: mineração de Bauxita**. 2012. p. 146. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

SRAJER, V.; STUART, N.J.; KOLADA, R; SZYMANSKI, J. Selection of Hauling Equipment: User Practices, **Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM)**. Published by AIME, Littleton. Colorado, USA pg. 638- 645, 1989.

TU, J.H.; HUCKA, V. J. Analysis of open-pit truck haulage system by use of computer model. **CIM Bulletin**, Utah, vol. 78, n° 879, p. 53 – 59, 1985.

ZORZAL, C. B. **Análise dinâmica via MEF das vibrações induzidas pelo desmonte de rochas**. 2019. p. 107. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

## ANEXO A – Dimensionamento de frota executado no PIAE

### DIMENSIONAMENTO DE PERFURAÇÃO

-Horas mensais		416 h
-Velocidade de perfuração (Vp)		15 m/h
-Comprimento do furo (Cf)		16,2
-Quantidade de furos por mês (F)		206
-Disponibilidade horária do equipamento (D)		0,5
-Tempo de perfuração por furo (Tp)	$Cf/Vp$	1,08 h
-Tempo total de perfuração necessário (Tt)	$Tp*F/D$	445 h
-Quant. equip. necessários	$Tt/horas\ mensais$	1,1

### DIMENSIONAMENTO DE CARREGAMENTO

-Horas mensais		416 h
-Volume da caçamba (V)		3,0 m <sup>3</sup>
-Fator de enchimento (FE)		0,8
-Densidade empolada (d)		1,7 t/m <sup>3</sup>
-Ciclo de carregamento (C)		0,25 min
-Disponibilidade horária do equipamento (D)		0,60
-Produtividade horária (Phor)	$V*FE/C*60$	576 m <sup>3</sup> /h
-Produtividade mensal (Pmen)	$Phor*horas\ mensais*D*d$	244.408 t/mês
-Quant. equip. necessários	$Produção\ mensal/Pmen$	1,1

### DIMENSIONAMENTO DE TRANSPORTE

-Horas mensais		416 h
-Volume da caçamba (V)		20 m <sup>3</sup>
-Fator de enchimento (FE)		0,80
-Tempo de carga (TC)	$V*FE/Phorescavadeira*60$	1,7 min
-Tempo de manobra e descarga (TD)		2,0 min
-Distância da frente de lavra à usina (D)		1,00 km
-Velocidade do caminhão descarregado (Veld)		30 km/h
-Velocidade do caminhão carregado (Velc)		20 km/h
-Tempo do caminho descarregado (Td)	$D/Veld*60$	2 min
-Tempo do caminho carregado (Tc)	$D/Velc*60$	3 min
-Disponibilidade horária do equipamento (di)		0,6
-Produtividade horária (Phor)	$V*FE/(TC+TD+ Tc+Td)*60$	111 m <sup>3</sup> /h
-Produtividade mensal (Pmen)	$Phor*horas\ mensais*di*d$	47.002 t/mês
-Quant. equip. necessários	$Produção\ mensal/Pmen$	5,9

## ANEXO B – Dimensionamento de frota proposto pelo autor

### DIMENSIONAMENTO DE CARREGAMENTO – 954 SME (PROPOSTO)

-Horas mensais		416 h
-Volume da caçamba (V)		3,7 m <sup>3</sup>
-Fator de enchimento (FE)		0,8
-Densidade empolada (d)		1,7 t/m <sup>3</sup>
-Ciclo de carregamento (C)		0,4167 min
-Disponibilidade Física (D)		0,9
-Utilização (U)		0,85
-Eficiência (E)		0,8
-Operação Conjugada (Oc)		0,9
-Produtividade horária (Phor)	$V*FE/C*60$	426 m <sup>3</sup> /h
-Produtividade mensal (Pmen)	$Phor*horas\ mensais*D*U*E*Oc*d$	166.018 t/mês
-Quant. equip. necessários	$Produção\ mensal/Pmen$	1,67

Utilizando o Volume da caçamba (V) dos diferentes equipamentos, obtém-se os demais resultados apresentados na (Tabela 8).

### DIMENSIONAMENTO DE TRANSPORTE - Grande porte (PROPOSTO)

-Volume da caçamba (V)		20 m <sup>3</sup>
-Fator de enchimento (FE)		0,9
- Produtividade horária 954 SME (Phor <sub>1</sub> )		426 m <sup>3</sup> /h
- Produtividade horária 954 C (Phor <sub>2</sub> )		380 m <sup>3</sup> /h
- Média Produtividade das escavadeiras (MPhor)	$Phor_1 + Phor_2 / 2$	403,17 m <sup>3</sup> /h
-Tempo de carga (TC)	$V*FE/(MPhor)*60$	2,68 min
-Tempo de manobra e descarga (TD)		2,0 min
-Distância da frente de lavra à usina (D)		1,00 km
-Velocidade do caminhão descarregado (Veld)		30 km/h
-Velocidade do caminhão carregado (Velc)		20 km/h
-Tempo do caminho descarregado (Td)	$D/Veld*60$	2 min
-Tempo do caminho carregado (Tc)	$D/Velc*60$	3 min
-Utilização (U)		0,85
-Eficiência (E)		0,9
-Operação Conjugada (Oc)		0,9
-Disponibilidade física (D)		0,9
-Produtividade horária (Phor)	$V*FE/(TC+TD+ Tc+Td)*60$	112 m <sup>3</sup> /h
-Produtividade mensal (Pmen)	$Phor*horas\ mensais*d*D*U*E*Oc$	48.0898 t/mês
-Quant. equip. necessários	$Produção\ mensal/Pmen$	5,7
-Quant. Max. Equip. por escav.	$(Phor_1 + Phor_2 / 2)*horas\ mensais/Pmen$	3,21

Utilizando o Volume da Caçamba (V) e Média de Produtividade das retroescavadeiras de pequeno porte (MPhor), obtém-se os demais resultados apresentados na (Tabela 9).

## ANEXO C – Revisão do plano de fogo

### Antes da Revisão

Densidade do Explosivo ( $\rho_e$ )		1,10	g/cm <sup>3</sup>
Densidade da Rocha ( $\rho_r$ )		2,70	g/cm <sup>3</sup>
Diametro do furo ( $d_e$ )		88,90	mm
Altura da Bancada ( $H_b$ )		15,0	mm
Ângulo de Perfuração ( $\alpha$ )		75,0	°
Afastamento (A)	Fixo	2,80	m
Espaçamento (E)	Fixo	4,10	m
Subfuração (S)	Fixo	1,00	m
Tamanho do Furo ( $H_f$ )	$H_f = H_b$	15,00	m
Tampão (T)	Fixo	1,5	m
Material Tampão	Pó de perfuração		
Amarração	Diagonal		

### Revisão

Densidade do Explosivo ( $\rho_e$ )		1,10	g/cm <sup>3</sup>
Densidade da Rocha ( $\rho_r$ )		2,70	g/cm <sup>3</sup>
Diametro do furo ( $d_e$ )		88,90	mm
Altura da Bancada ( $H_b$ )		15,0	mm
Ângulo de Perfuração ( $\alpha$ )		75,0	°
Afastamento (A)	$A = 0,0123[2 \rho_e/\rho_r + 1,5] * d_e$	2,53	m
Espaçamento (E)	$E = 1,4 * A$	3,54	m
Subfuração (S)	$S = 0,3 * A$	0,76	m
Tampão (T)	$T = 0,7 * A$	1,77	m
Tamanho do Furo ( $H_f$ )	$H_f = H_b/\cos(\alpha) + (1 - \alpha/100) * S$	16,46	m
Material Tampão	Brita		
Amarração	Linha		

### Realizado

Devido às condições particulares da rocha, bem como objetivos granulométricos, custo-benefício e restrições de segurança, a malha adota foi:

Afastamento (A)	2,5	m
Espaçamento (E)	4,10	m

Amarração: Linha e Diagonal, a depender das famílias de falha e mecanismos de ruptura em cada face. Os demais parâmetros foram adotados conforme a revisão.