



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Graduação em Engenharia de Minas



Matheus Adriano Bonifácio Dias

DIMENSIONAMENTO DE FROTA PARA AUMENTO DA PRODUÇÃO

Ouro Preto

2023

Matheus Adriano Bonifácio Dias

DIMENSIONAMENTO DE FROTA PARA AUMENTO DA PRODUÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas, sob orientação do Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza.

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D541d Dias, Matheus Adriano Bonifácio.
Dimensionamento de frota para aumento da produção. [manuscrito] /
Matheus Adriano Bonifácio Dias. - 2023.
102 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e recursos minerais - Carregamento e transporte. 2.
Máquinas de mineração. 3. Ativos naturais - Plano de Exaustão. 4.
Indicadores Operacionais. I. Souza, Felipe Ribeiro. II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.68

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Adriano Bonifácio Dias

Dimensionamento de frota para aumento da produção

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

Aprovada em 30 de Novembro de 2023

Membros da banca

Dr. - Felipe Ribeiro Souza - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
Eng^a- Bárbara Loureiro Cardoso Marinho da Costa- Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Allan Santos- Universidade Federal de Ouro Preto

Felipe Ribeiro Souza, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/01/2024



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Ribeiro Souza, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/01/2024, às 15:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0650792** e o código CRC **82C06686**.

“Os dias prósperos não vêm por acaso; nascem de muita fadiga e persistência “

Henry Ford

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente por me conceder saúde e força para encarar os desafios e ir em busca dos meus objetivos.

Aos meus pais, José e Aparecida, pelo amor e apoio incondicional.

À engenheira de minas, Bárbara Loureiro, por todos os ensinamentos e suporte fornecidos sobre o tema abordado.

Ao meu orientador, Felipe Ribeiro, por todo o auxílio necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O dimensionamento de equipamentos é uma etapa crucial para a viabilidade econômica de empreendimentos de mineração a céu aberto. Isso ocorre porque os custos de aquisição e manutenção dos equipamentos representam uma parcela significativa dos custos totais do empreendimento. O presente trabalho tem como objetivo dimensionar os equipamentos de carregamento e transporte em uma mineração a céu aberto localizada no quadrilátero ferrífero. O dimensionamento foi realizado para um cenário de aumento da produção determinado por um plano de exaustão (*Life Of Mine*). Os principais conceitos apresentados neste trabalho se referem à metodologia de cálculo envolvida na realização do dimensionamento de frota. O cálculo foi realizado com base nos indicadores operacionais dos equipamentos já utilizados na mineradora, bem como na produção planejada para o período de 2028 a 2042. Os resultados obtidos indicam a necessidade de substituição dos equipamentos já demasiadamente utilizados e em fim de vida útil, além da aquisição de equipamentos de acordo com a necessidade de ampliação da capacidade de movimentação das frotas. A continuidade da configuração atual dos equipamentos utilizados para a realização do plano de exaustão, conforme o modelo de produção proposto, pode impactar diretamente na realização das operações, tendo em vista a grande quantidade de equipamentos necessários. Deste modo, torna-se necessário a revisão do modelo de produção proposto ou da adequação da frota em virtude da mudança de porte e/ou compatibilidade ideal dos equipamentos de carga e de transporte.

Palavras-chaves: Dimensionamento de Frota, Plano de Exaustão, Produção planejada, Equipamentos de Carregamento, Equipamentos de Transporte, Indicadores Operacionais.

ABSTRACT

Equipment sizing is a crucial stage in the economic viability of open-pit mining projects. This is because the costs of purchasing and maintaining the equipment represent a significant portion of the total costs of the project. The aim of this work is to size the loading and transportation equipment in an open-pit mining project located in the Iron Quadrangle. The sizing was carried out for a scenario of increased production determined by an exhaustion plan (*Life Of Mine*). The main concepts presented in this work refer to the calculation methodology involved in carrying out fleet sizing. The calculation was based on the operational indicators of the equipment already in use at the mining company, as well as the planned production for the period 2028 to 2042. The results obtained indicate the need to replace equipment that is already overused and at the end of its useful life, as well as acquiring equipment in line with the need to expand the fleet's handling capacity. Continuing with the current configuration of the equipment used to carry out the exhaustion plan, according to the proposed production model, could have a direct impact on operations, given the large amount of equipment required. This makes it necessary to revise the proposed production model or to adapt the fleet due to a change in the size and/or ideal compatibility of the loading and transportation equipment.

Keywords: Fleet sizing, Exhaustion plan, Planned production, Loading equipment, Transportation equipment, Operational indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escavadeira Hidráulica CAT 6060	11
Figura 2 - Carregadeira 994H	12
Figura 3 - Caminhão fora-de-estrada CAT 793D	14
Figura 4 - Caminhão fora-de-estrada CAT 793F.....	14
Figura 5 - Ciclo de carregamento.....	20
Figura 6 - Ciclo de atividade dos caminhões	22
Figura 7 - Compatibilidade entre caminhões fora-de-estrada e escavadeiras hidráulicas.	24
Figura 8 - Compatibilidade entre caminhões fora-de-estrada e carregadeiras. ..	25
Figura 9 - Sólidos definidos para o plano de exaustão	32
Figura 10 - Sólido correspondente a uma região da área de lavra.	32
Figura 11 - Centro de massa determinado para o sólido de lavra.	33
Figura 12 - Centros de massa para cada ponto de origem obtidos para o ano de 2028.	33
Figura 13 - Linhas de trajeto traçadas para as origens e destinos do ano de 2029.	34
Figura 14 - Distância média de transporte obtida entre uma origem e um destino no ano de 2029.	35
Figura 15 – Relação entre a capacidade da frota de carregadeiras e as movimentações de serviços auxiliares e retomada de estoque.	60
Figura 16 – Percentual de capacidade de movimentação das frotas em relação à capacidade total de carregamento.	61
Figura 17 – Composição das frotas de escavadeiras e de carregadeiras ao longo do plano.	62

Figura 18 - Capacidade da frota de carregamento e a movimentação total planejada.....	63
Figura 19 – Capacidade excedente de movimentação da frota de carregamento.	64
Figura 20 – Capacidade de movimentação da frota de transporte e a movimentação total planejada.....	70
Figura 21 – Capacidade excedente da frota de transporte ao longo do plano....	71
Figura 22 – DMT média ao longo dos anos do plano.	72
Figura 23 – Produtividade média dos equipamentos de transporte	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos de ciclo total para a frota de escavadeiras CAT6060.....	29
Tabela 2 - Produtividade horária para a frota de escavadeiras.....	29
Tabela 3 - Tempo de ciclo para as carregadeiras da frota 994H.	30
Tabela 4 - Produtividade horária para a frota de carregadeiras.....	30
Tabela 5 - DMT média entre origem e destino e DMT Total para os anos de 2028 a 2031 do plano.....	36
Tabela 6 - DMT média entre origem e destino e DMT Total para os anos de 2032 a 2035 do plano.....	37
Tabela 7 - DMT média em quilômetros entre origem e destino e DMT Total para os anos de 2036 a 2042 do plano.	38
Tabela 8 - Distância média final de transporte para os anos do plano.	39
Tabela 9 - Tempo médio por ciclo.....	41
Tabela 10 - Tempo de trajeto total para os equipamentos de transporte.....	42
Tabela 11 - Tempos de ciclo total dos equipamentos de transporte.....	43
Tabela 12 - Produtividade dos equipamentos de transporte.....	44
Tabela 13 - Disponibilidade física dos equipamentos.	45
Tabela 14 - Disponibilidade física dos equipamentos.	46
Tabela 15 - Disponibilidade física das carregadeiras.....	48
Tabela 16 - Total de horas trabalhadas das carregadeiras.....	48
Tabela 17 - Disponibilidade física para caminhões.....	49
Tabela 18 - Horas trabalhadas totais dos caminhões da frota 793D	50
Tabela 19 - Horas trabalhadas totais dos caminhões da frota 793F.....	50
Tabela 20 - Movimentação total programada pelo plano de exaustão.....	52

Tabela 21 - Disponibilidade física dos equipamentos utilizada no dimensionamento da capacidade das frotas atuais.....	54
Tabela 22 - Disponibilidade física utilizada para o dimensionamento das novas frotas de carga e de transporte.	55
Tabela 23 - Disponibilidade física projetada para o período de extensão da vida útil dos equipamentos.	56
Tabela 24 - Composição da frota de carregamento.....	58
Tabela 25 - Composição da frota de escavadeiras ao longo do plano.	64
Tabela 26 - Composição da frota de carregadeiras ao longo do plano.....	66
Tabela 27 - Composição da frota de transporte ao longo do plano.	68

LISTA DE SIGLAS

DF	Disponibilidade Física
DMT	Distância Média de Transporte
HC	Hora Calendário
HD	Hora Disponível
HO	Hora Ociosa
HT	Hora Trabalhada
ROM	Run Of Mine
UT	Utilização

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO	2
1.1.1	Objetivos Específicos	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	MINERAÇÃO A CÉU ABERTO	3
2.2	PLANEJAMENTO DE LAVRA	5
2.2.1	Longo Prazo	5
2.2.1.1	Plano de Exaustão	6
2.2.2	Médio Prazo	7
2.2.3	Curto Prazo	7
2.3	OPERAÇÕES DE CARREGAMENTO E DE TRANSPORTE	8
2.3.1	Operações de Carregamento	9
2.3.1.1	Equipamentos de Carregamento	9
2.3.2	Operações de Transporte	13
2.3.2.1	Equipamentos de Transporte	13
2.4	PRODUTIVIDADE HORÁRIA	16
2.4.1	Disponibilidade Física (DF)	17
2.4.2	Fator de Utilização (UT)	18
2.4.3	Tempos de Ciclo (TC)	18
2.4.3.1	Carregamento	19
2.4.3.2	Transporte	20
2.5	SISTEMA DE DESPACHO ELETRÔNICO	22

2.6	DIMENSIONAMENTO DE FROTA POR ÍNDICES OPERACIONAIS...	23
2.6.1	Substituição/Aquisição de Equipamentos.....	26
3	METODOLOGIA	27
3.1	DIMENSIONAMENTO DA PRODUTIVIDADE	27
3.1.1	Equipamentos de Carregamento	27
3.1.1.1	Escavadeiras	28
3.1.1.2	Carregadeiras	30
3.1.2	Equipamentos de Transporte.....	31
3.1.2.1	Cálculo da Distância Média de Transporte	31
3.1.2.2	Tempo de Ciclo Total	40
3.2	MODELO DE AQUISIÇÃO/SUBSTITUIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS .	44
3.2.1	Horímetro dos Equipamentos de Carregamento.....	45
3.2.1.1	Escavadeiras	45
3.2.1.2	Carregadeiras	47
3.2.2	Horímetro dos Equipamentos de Transporte	49
3.3	DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DAS FROTAS	52
3.3.1	Frotas Atuais	53
3.3.2	Frotas Novas	54
4	RESULTADOS.....	58
4.1	EQUIPAMENTOS DE CARREGAMENTO.....	58
4.1.1	Escavadeiras	64
4.1.2	Carregadeiras.....	66
4.2	EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE	68

5 CONCLUSÃO	74
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
REFERÊNCIAS	77
ANEXOS.....	81

1 INTRODUÇÃO

O setor minerário é fundamental para a economia global e para a vida em sociedade, pois fornece os recursos necessários para inúmeros processos de fabricação, insumos industriais e aplicações domésticas. Com o aumento da demanda por esses recursos, as reservas minerais se esgotam cada vez mais, aumentando a complexidade do processo de extração. A indústria da mineração está cada vez mais focada em maximizar a recuperação dos minerais de forma sustentável, tornando necessário o aprimoramento de todos os processos envolvidos.

Dentro desse contexto, o dimensionamento das frotas de carregamento e transporte é um fator determinante para as operações de um empreendimento mineiro, pois impacta diretamente nos custos operacionais e na segurança das operações.

O dimensionamento das frotas de carga e de transporte deve atender aos objetivos pré-estabelecidos pelas diretrizes da empresa, tanto no horizonte de curto e médio prazo, quanto no longo prazo. Este processo deve ser realizado através de estudos e análises referentes às características dos equipamentos, capacidade manuseada, além de fatores como topografia do terreno, infraestrutura local e economicidade.

Segundo Silva (2009), é indicado o estudo periódico do dimensionamento da frota para garantir a eficiência das operações. Koppe (2007) destaca a importância de um planejamento que relacione de forma efetiva o porte das operações, os tipos de equipamentos e a alocação dos mesmos, de modo a garantir a compatibilização das frotas de carregamento e transporte. Borges (2013) afirma que um dos métodos mais utilizados para o dimensionamento de frotas na mineração é o estudo de estimativa de capacidade da frota por meio dos indicadores operacionais.

Este estudo compreende a metodologia realizada para o dimensionamento das frotas de carregamento e transporte de um plano de exaustão em uma mina de grande porte do quadrilátero ferrífero. Os resultados obtidos são apresentados e analisados, destacando as implicações para as operações da mina.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é dimensionar as frotas de carregamento e de transporte necessárias para o atendimento da movimentação estabelecida por um plano de exaustão (*Life Of Mine*) em um cenário de aumento da produção, em uma mina de grande porte localizada na região do Quadrilátero Ferrífero.

1.1.1 Objetivos Específicos

Dimensionar a capacidade da frota de carregadeiras considerando a movimentação necessária para retomada de estoques e realização de serviços auxiliares estabelecidos pelo plano.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo irá apresentar todos os estudos e pesquisas utilizados como referencial teórico para o desenvolvimento do trabalho, bem como, as considerações e conceitos, relacionados ao planejamento de lavra, às operações de carregamento e de transporte, à seleção e dimensionamento dos equipamentos através dos indicadores de produtividade.

2.1 MINERAÇÃO A CÉU ABERTO

Segundo Curi (2017) a metodologia de lavra escolhida para o início de um empreendimento é responsável por coordenar e estruturar as diversas operações unitárias que compreendem e viabilizam o melhor aproveitamento possível para a jazida.

Desta forma, a escolha pelo método de lavra está interligada aos fatores responsáveis pela obtenção do maior aproveitamento econômico possível, maior segurança para a lavra e menores impactos ambientais.

Segundo Curi (2017) alguns fatores são o princípio para a escolha do método ideal de lavra, sendo eles responsáveis por definir a estrutura dos ciclos de trabalho, a sequência da extração, bem como a definição dos equipamentos e das estratégias de uso. Esses fatores são:

- A jazida mineral e suas particularidades; como localização, geometria, estrutura envolvente e ecossistemas circundantes.
- Condições de trabalho, cenário social, bem como, as circunstâncias legais vigentes envolvidas.
- Plano econômico e financeiro relacionado à viabilidade da jazida e o seu aproveitamento econômico global.

De acordo com Curi (2017) a classificação de um método de lavra, além de associada ao estudo desses fatores, também está diretamente ligada ao modelo operacional e a situação em que seus operadores estão envolvidos.

Para o caso de uma mineração a céu aberto, a mesma é caracterizada dessa forma por não ocorrer ingresso de pessoal em vias subterrâneas para realização de atividades (CURI, 2017). Pode-se afirmar então que a lavra de minas a céu aberto se refere somente à realização das operações em superfície.

De acordo com Hartman e Mutmansky (2002) o crescimento constante da eficácia das operações à céu aberto, aliado a uma crescente complexidade de obtenção de depósitos que possuam viabilidade econômica em métodos de lavra subterrânea, ocasionam em uma predileção pela lavra à céu aberto.

Para minérios metálicos, o método de lavra a céu aberto utilizado com maior frequência é o método a seco de lavra por bancadas (BORGES, 2013). Na execução da lavra pelo método de bancadas, realiza-se a retirada da camada de capeamento localizada sobre o corpo de minério, e o mesmo é depositado em pilhas próximas da abertura da cava, dessa forma o minério é exposto possibilitando sua extração (Curi, 2017).

As operações que compõem a extração do minério são denominadas operações unitárias de lavra e correspondem a retirada e transporte do material até o destino desejado. Sendo o minério destinado ao processamento ou pilhas de oportunidade e o estéril às pilhas específicas de disposição (FERREIRA, 2021).

Conforme Curi (2014, p.103), “O sucesso das operações de lavra a céu aberto é, assim altamente dependente da eficiência das operações unitárias de lavra, isto é, perfuração, desmonte, carregamento e transporte”. A estruturação e organização completa de um projeto de lavra é de extrema importância para o funcionamento adequado das atividades de uma mineração a céu aberto, onde destacam-se três fatores fundamentais para atingir a máxima eficiência no processo. São eles:

- O plano de remoção para a camada de capeamento sobre o corpo mineralizado e o processo de restauração do solo removido;

- O plano de recuperação das áreas degradadas pelas atividades mineradoras;
- A metodologia utilizada para a disposição dos materiais não aproveitados, como o estéril, bem como, o tratamento do rejeito e o modelo de disposição a ser utilizado.

2.2 PLANEJAMENTO DE LAVRA

O planejamento de lavra é fundamental para a realização das atividades em uma mina, no qual, o mesmo tem como principal objetivo assegurar que as operações unitárias aconteçam do modo mais eficiente, seguro, lucrativo e que cause os menores impactos possíveis ao meio ambiente (HUSTRULID, KUCHTA e MARTIN, 2013).

Para Amaral (2008) a relevância do planejamento de lavra é evidenciada durante toda a vida útil de uma mina, abrangendo desde as fases iniciais de análise de viabilidade do empreendimento até o fim das atividades.

O planejamento de lavra pode ser classificado em três categorias, são eles: planejamento de longo prazo ou estratégico, planejamento de médio prazo ou tático e planejamento de curto prazo ou operacional (ALMEIDA, 2017).

2.2.1 Longo Prazo

O planejamento de longo prazo de uma empresa é responsável por determinar estratégia da lavra durante os anos de operação da mina, visando a obtenção da cava ótima (AMARAL, 2008).

De acordo com Oliveira (2023), o planejamento estratégico envolve basicamente quatros princípios de atuação. São eles:

- Qual a possibilidade de atuação da empresa sobre fatores externos, ou seja, o que é possível ou não de se controlar em relação ao meio externo;

- Qual a capacidade da empresa em relação à conhecimento, competência e potencial de ação;
- Quais são as expectativas executivas, das equipes e pessoais;
- Quais são os compromissos sociais e éticos, dos quais a empresa tem o dever de cumpri-los.

Para Curi (2014) o planejamento de longo prazo tem como objetivo definir os limites da reserva lavrável, a quantidade de estéril que deverá ser retirada, bem como, estabelecer as rotas de lavra através do sequenciamento, além de selecionar os equipamentos e definir as frotas adequadas para a operação durante os anos.

Segundo Thorley (2012) as funções do planejamento de longo prazo têm seu início nos estudos preliminares de viabilidade econômica da mina e permanecem durante toda a operação de lavra, estendendo-se até o fim da vida útil da mina, com o intuito de maximizar o retorno financeiro do empreendimento.

Conforme Almeida (2017, p.9) “É comum o planejamento de longo prazo dar ênfase a toda vida da mina, com planos quinquenais a anual o que ocorrerão até a exaustão dela, o que chamamos de LOM (Life of Mine).”

2.2.1.1 Plano de Exaustão

Segundo Carmo (2001) o fim da vida útil de uma mina a céu aberto é definido pelos seus limites finais de cava, estes estabelecidos conforme o cálculo e determinação das reservas tecnicamente lavráveis e do sequenciamento de retirada e disposição do estéril.

A obtenção da cava final e definição do melhor cenário econômico possível são extremamente desafiadores em um projeto, visto que, os limites que estabelecem a cava final devem ser inicialmente determinados na fase de projeto do empreendimento e constantemente reavaliados ao longo dos anos de operação.

Dessa forma, tem-se a confecção do plano de exaustão, que tem como objetivo a maximização do valor presente líquido do projeto, em função da definição de uma cava final ótima (CARMO, CURI e SOUSA, 2006).

2.2.2 Médio Prazo

Almeida (2017) se refere ao planejamento de médio prazo como o responsável pela confecção dos planos trimestrais, semestrais e anuais, no quais são determinadas as metas e políticas adotadas para realização dos objetivos estabelecidos pelo plano estratégico.

Ainda de acordo com Almeida (2017) é função do planejamento de médio prazo a gestão e otimização dos recursos disponíveis para a conclusão dos objetivos estabelecidos previamente pelo plano planejamento de longo prazo.

Para Campos (2017), o planejamento tático se concentra no cumprimento dos objetivos intermediários de lavra, provenientes da decomposição dos objetivos estratégicos, dessa forma seu horizonte de atuação pode compreender períodos de até 5 anos.

2.2.3 Curto Prazo

De acordo com Costa (2005) o planejamento de curto prazo é responsável por definir quais frentes de lavra serão responsáveis por fornecer o material para a usina de beneficiamento, de acordo com as qualidades de teor e especificidades granulométricas estabelecidas.

Dessa forma, é função do planejamento de curto prazo definir qual será o ritmo de lavra ideal em cada frente, quais serão as prioridades, bem como, definir a alocação dos equipamentos de carregamento, transporte e de infraestrutura para cumprimento e atendimento os objetivos estabelecidos pelos planos de lavra.

Segundo Thorley (2012) o planejamento de curto prazo compreende a confecção de planos de lavra progressivos que podem variar de planos anuais de doze a dezoito meses, planos trimestrais, mensais, semanais e até mesmo diários.

Ainda de acordo com Thorley (2012), o planejamento de curto prazo deve envolver um relacionamento extremamente próximo e incorporado à usina de beneficiamento, as operações e infraestrutura de mina, bem como, manutenção e elétrica, tendo em vista, que as atividades de várias dessas estruturas estarão conectadas e serão coordenadas pelos planos de curto prazo.

Para Silva apud Mandarino (2018) foram desenvolvidas metodologias e ferramentas que otimizassem o processo de tomada de decisão entre o planejamento de curto prazo e as estruturas envolvidas nas operações de mina. Dentre essas ferramentas destaca-se o “*Line Up*”, utilizado para o acertamento entre as informações do planejamento com as demais operações de mina.

2.3 OPERAÇÕES DE CARREGAMENTO E DE TRANSPORTE

De acordo com Quevedo (2009) as operações de carregamento e de transporte constituem as atividades de extração que compreendem as etapas de escavação, carregamento e posteriormente o transporte até o ponto de descarga. Aliado a isso, as atividades de escavação e carregamento são comumente executadas por escavadeiras e carregadeiras, enquanto o transporte pode ser realizado por caminhões, correias transportadoras e trens.

Segundo Borges (2013) as operações de carregamento e transporte são responsáveis por uma parcela muito significativa dos custos totais que envolvem as atividades de uma mineração a céu aberto, sendo responsáveis por cerca de 66% dos custos totais. Com isso, torna-se fundamental o uso de medidas que visem tornar eficiente o dimensionamento das frotas responsáveis, bem como, reduzir os custos associados.

2.3.1 Operações de Carregamento

Segundo Coutinho (2017) definem-se as operações de carregamento como as atividades responsáveis por extrair todo o material de interesse presente em uma frente de lavra, esteja ele desmontado ou não e logo após carregá-lo em um sistema de transporte adequado.

Para a determinação de uma frota eficiente de carregamento, no qual haja impacto positivo sobre os índices de produtividade, deve-se inicialmente avaliar algumas características dos equipamentos, como: custo de aquisição, força de deslocamento, capacidade produtiva, capacidade de desagregação, bem como, as características da mina, como necessidade de produção e altura dos bancos (COUTINHO, 2017).

De acordo com Pinto e Dutra (2008) os equipamentos de carregamento devem ser dimensionados de acordo com alguns critérios, tais como: tamanho da caçamba, equipamentos de transporte associados e grau de seletividade da lavra. Estes critérios têm como objetivo dimensionar os equipamentos de modo a controlar o tamanho dos blocos a serem descarregados no britador, evitar números excessivos de ciclo e melhor adequar a frota aos planos de lavra e atingimento das metas.

2.3.1.1 Equipamentos de Carregamento

As operações de escavação e carregamento em minas a céu aberto são em sua maioria realizadas por escavadeiras, a cabo ou hidráulicas, e carregadeiras sobre pneus, segundo Ricardo e Catalani (2007) essas operações podem ser realizadas por equipamentos iguais ou distintos.

Segundo Jaworski (1997) as escavadeiras e carregadeiras estão inseridas em duas categorias; equipamento escavador elevador e escavador carregador respectivamente, sendo este trabalho realizado com equipamentos de carregamentos, os mesmos terão maior destaque a seguir.

De acordo com Hustrulid (2013) o equipamento de maior importância nas operações de extração em minerações a céu aberto, são as escavadeiras sobre esteiras, sendo esses equipamentos capazes de realizar a escavação e carregamento de material sem que haja deslocamento do equipamento em relação a sua caçamba, segundo Jaworski (1997).

De acordo com Uzan (2020) esses equipamentos são capazes de realizar escavações em materiais de elevada competência, além de possuírem alto fator de enchimento, bem como, existem modelos abastecidos à diesel como também há modelos de escavadeiras alimentados por energia elétrica.

Segundo Borges (2013) em outros países mineradores, onde a lavra exige equipamentos de porte muito elevado, utiliza-se escavadeiras de grande porte à cabo, enquanto no Brasil utiliza-se em sua maioria as escavadeiras do tipo “shovel”.

Para Ricardo e Catalani (2007), as escavadeiras do tipo “shovel” são comumente utilizadas devido a sua capacidade de realizar cortes frontais ascendentes, sendo o equipamento composto por uma caçamba frontal conectada a um braço transversal articulado, no qual, se permite realizar cortes em bancadas que estejam em um nível acima do nível onde o equipamento se encontra.

As escavadeiras hidráulicas do tipo “shovel”, possuem grandes vantagens em sua operação, tais como: ciclos mais rápidos, vida útil extensa, além de grande alcance de escavação (MOREIRA, 2018).

As operações de carregamento que são efetuadas por escavadeiras na mina em estudo, são realizadas por dois modelos: as P5500 da fabricante Komatsu e as CAT 6060 da fabricante Caterpillar.

A Figura 1 apresenta um dos modelos utilizados, as escavadeiras CAT 6060.

Figura 1 - Escavadeira Hidráulica CAT 6060



Fonte: Caterpillar (2023).

Diferentemente do que ocorre com as escavadeiras, no qual as mesmas possuem maior força de penetração da caçamba, as carregadeiras ou pás-carregadeiras são equipamentos destinados apenas para o carregamento, podendo ser constituídas tanto de esteiras quanto por rodas, e possuem braços articulados que com seu acionamento elevam a caçamba preenchida de material, possibilitando assim um posterior despejo, em um local de interesse ou equipamento de transporte (RACIA, 2016).

De acordo com Uzan (2020) as carregadeiras são equipamentos de carregamento utilizados para operar em situações na qual seja necessário carregar materiais fragmentados, sem que haja a necessidade de escavação. Além disso, indica-se que o material esteja seco, assim como o solo de apoio do equipamento seja firme e sustente o equipamento.

Sendo as carregadeiras sobre pneus os equipamentos de maior estudo deste trabalho, as pesquisas sobre as carregadeiras se destinaram a este tipo de equipamento e ao aprofundamento dos conceitos que envolvem a sua operação.

Conforme Pinto e Dutra (p.73, 2008) “As carregadeiras são utilizadas quando o material desmontado não oferece resistência à penetração da caçamba”. Ainda de acordo com Pinto e Dutra (2008), as carregadeiras sobre pneus possuem grande

vantagem em relação as escavadeiras, tendo em vista, o fator de mobilidade, tornando o ciclo menor se comparado as escavadeiras.

Segundo Coutinho (2017), este impacto no ciclo fica evidente quando comparadas as velocidades de deslocamento, as carregadeiras se deslocam em uma velocidade de até 45 km/h, enquanto as escavadeiras se deslocam a uma velocidade muito menor, cerca de 1,5 km/h.

Para Teixeira (2016), a utilização das carregadeiras é fundamental em uma mineração à céu aberto, tendo em vista, sua utilização para as atividades de ajuste de qualidade do ROM, ou seja, blendagem do material.

Teixeira (2016) também destaca a possibilidade de utilização das mesmas em frentes prioritárias em função das eventuais indisponibilidades das escavadeiras devido aos períodos de manutenção, bem como, na retomada dos estoques de minério para alimentação da usina em períodos intensos de chuva e conseqüente paralisação das frentes de lavra.

Na mina em estudo, utiliza-se o modelo de carregadeira Caterpillar 994H para as operações de carregamento, como apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Carregadeira 994H



Fonte: Caterpillar (2023).

2.3.2 Operações de Transporte

Em minerações a céu aberto existem diversas formas de transporte que podem ser empregadas, dentre elas estão o transporte por caminhões fora-de-estrada, correias transportadoras e vagões.

Sendo o foco do trabalho as operações de transporte realizadas por caminhões, a pesquisa e revisão das referências bibliográficas se destinou para este modelo de operação de transporte.

2.3.2.1 Equipamentos de Transporte

De acordo com Lopes (2010) a operação de transporte por caminhões fora-de-estrada é realizada após o fim das outras três operações unitárias; perfuração, desmonte e carregamento. Inicialmente tem-se a perfuração e desmonte do material “*in situ*” via explosivos, em contrapartida em materiais com menor resistência também podem ocorrer desmontes mecânicos no qual se utilizam equipamentos como tratores, escavadeiras e até mesmo carregadeiras, dependendo do nível de competência do material. Com o material já fragmentado, os caminhões são então carregados pelas escavadeiras ou carregadeiras e a partir disso seguem para o destino programado, seja ele, o sistema de britagem, depósito de estéril ou pilha de estoque.

Em minas a céu aberto, principalmente aquelas nas quais se tem a necessidade de alta movimentação de material, é fundamental o uso de caminhões fora-de-estrada, devido ao seu grande porte e capacidade movimentação elevado, bem como, são equipamentos com muita força e unicamente projetados para esse tipo de operação (RICARDO e CATALANI, 2007).

As Figuras 3 e 4 apresentam os caminhões fora-de-estrada, da fabricante Caterpillar, utilizados na mina em estudo.

Figura 3 - Caminhão fora-de-estrada CAT 793D



Fonte: Caterpillar (2023).

Figura 4 - Caminhão fora-de-estrada CAT 793F.



Fonte: Caterpillar (2023).

As operações de transporte representam uma parcela muito significativa dos custos envolvidos nas atividades de lavra, isso se dá devido ao alto consumo de combustível, no caso diesel, exigido para a operação desses equipamentos. Este método de transporte pode representar cerca de 52% dos custos totais de lavra,

enquanto as demais atividades estão divididas em: 16% para o carregamento e 32% para perfuração e desmonte (TRUEMAN,2001).

De acordo com Lopes (2010) em minerações a céu aberto destacam-se algumas vantagens no transporte de material por caminhões fora-de-estrada, tais como:

- Elevada flexibilidade operacional, pois permite a alocação dinâmica dos equipamentos, redirecionando equipamentos de uma frente para outra de acordo com a necessidade contida nos planos de lavra.
- Permite que a lavra possa ocorrer em diferentes níveis, garantindo a possibilidade de blendagem do material quando necessário, mantendo assim a qualidade do material para alimentação da usina.
- Por operar de forma conjugada com os equipamentos de carregamento, pode se obter diferentes configurações de acordo com o “fleet match” adequado, aumentando assim as opções de configuração das frotas.

Por outro lado, segundo Lopes (2010) este sistema de transporte em minas a céu aberto pode apresentar algumas desvantagens, como:

- Necessidade de constante manutenção e umectação das vias de acesso, que no geral estão associados à custos elevados, devido a necessidade de equipamentos de apoio, como: motoniveladoras e caminhões-pipa.
- Paralisação parcial ou total das operações quando ocorrem fortes chuvas ou ocorrência de neblina, devido as instabilidades causadas nas vias e acessos, bem como, a baixa visibilidade gerada.
- Necessidade de incremento do número de equipamentos da frota ou do porte da frota para atendimento da produção em virtude do aumento da distância de transporte.

2.4 PRODUTIVIDADE HORÁRIA

Segundo Ferreira (2021) pode se definir a produção horária dos equipamentos de dois modos: como uma relação direta de movimentação de massa por hora, sendo está denominada como produtividade horária efetiva (PHE) do equipamento, no qual são utilizados a carga útil do equipamento (CM) e o tempo de ciclo (T_{Ciclo}), conforme a Equação 1. O outro modo se dá através da relação entre carga real e carga nominal do equipamento, sendo está expressa em percentual.

$$PHE = \frac{CM}{T_{Ciclo}} \quad (1)$$

A produtividade de um equipamento de carga ou de transporte pode ser calculada a partir da definição de algumas propriedades dos equipamentos, bem como, de suas operações.

De acordo com Silva (2011) o entendimento de alguns conceitos, é fundamental para a determinação da produtividade de um equipamento, tais como:

- Volume de caçamba: trata-se da capacidade volumétrica da caçamba em conter determinada quantidade de material em função da sua geometria.
- Carga Útil (*Payload*): refere-se à capacidade máxima de carga ao qual o equipamento pode ser carregado e opere sem que haja riscos operacionais.
- Carga de Tombamento (*Tipping load*): refere-se à capacidade máxima da concha dos equipamentos de carga, no qual os mesmos podem erguer sem que ocorra perda de estabilidade.
- Empolamento: é uma característica intrínseca de rochas e solos, no qual os mesmos são submetidos a uma expansão volumétrica quando retirados de suas condições *in situ*.
- Resistência de Rampa: trata-se da resistência de movimentação causada por uma inclinação de uma rampa de acesso aos equipamentos de

transporte, sendo causada pela atuação de uma das componentes da força gravitacional.

- Resistência ao Rolamento: refere-se à resistência causada pelas condições do solo à movimentação dos pneus dos equipamentos.

Além desses fatores citados por Silva (2011) também são destacados a disponibilidade física do equipamento, o fator de utilização e o tempo de ciclo como fundamentais para a determinação da produtividade e serão abordados de maneira separada nos tópicos a seguir.

2.4.1 Disponibilidade Física (DF)

Para Borges (2013) a disponibilidade física (DF) dos equipamentos pode ser definida como o percentual de tempo no qual o equipamento se encontra apto para realização dos trabalhos. A DF se trata da relação entre as horas disponíveis (HD) e das horas calendário (HC), que correspondem ao total de horas calculadas de acordo com o período de trabalho, seja ele semanal, mensal ou anual (UZAN,2020).

De acordo com Santos (2022), as condições de operação no qual o equipamento é utilizado, bem como, a quais procedimentos operacionais o mesmo é submetido, são fatores essenciais para a determinação das horas de manutenção (HM) necessárias, sejam elas preventivas ou corretivas, sendo estes fatores cruciais para determinação da DF.

O indicador de disponibilidade física dos equipamentos pode obtido ser através da Equação 2.

$$DF = \frac{HD}{HC} \times 100 = \frac{HC - HM}{HC} \times 100 \quad (2)$$

2.4.2 Fator de Utilização (UT)

Segundo Racia (2016) podemos determinar o fator de utilização como o percentual de operação do equipamento, ou seja, é um indicador referente as horas trabalhadas (HT) de um equipamento, no qual ele opera sem qualquer impeditivo.

Para isso, determina-se as horas improdutivas (HI) do mesmo em relação as horas disponíveis (HD). O fator de utilização pode ser obtido através da Equação 3.

$$UT = \frac{HD - HI}{HD} \times 100 = \frac{HT}{HD} \times 100 \quad (3)$$

De acordo com Uzan (2020) em uma mineração a céu aberto alguns impedimentos operacionais podem ser observados durante as operações, sendo estes responsáveis por afetar o fator de utilização dos equipamentos, entre eles estão:

- Falta de operador;
- Condições climáticas: fortes chuvas ou presença de cerração;
- Más condições de operação nas frentes de lavra.

2.4.3 Tempos de Ciclo (TC)

Segundo Racia (2016) pode-se definir o tempo de ciclo de um equipamento, como o somatório de todos os tempos referentes as atividades que compõem seu ciclo total de operação, no qual essas atividades ocorrem repetidas vezes.

De acordo com Pinto e Dutra (2008) essas atividades podem ser descritas como movimentos elementares, nos quais são determinados os seus respectivos tempos.

Esses tempos, também definidos como tempos elementares, quando observados dentro de um grande número de ciclos, destaca-se que para um equipamento específico alguns tempos possuem menor variação em relação a outros, os definindo

em tempos de maior constância (tempos fixos) e menor constância (tempos variáveis). Entre os tempos fixos, temos por exemplo os tempos de carregamento e de manobra, enquanto nos tempos variáveis tem-se os tempos de transporte cheio ou vazio.

2.4.3.1 Carregamento

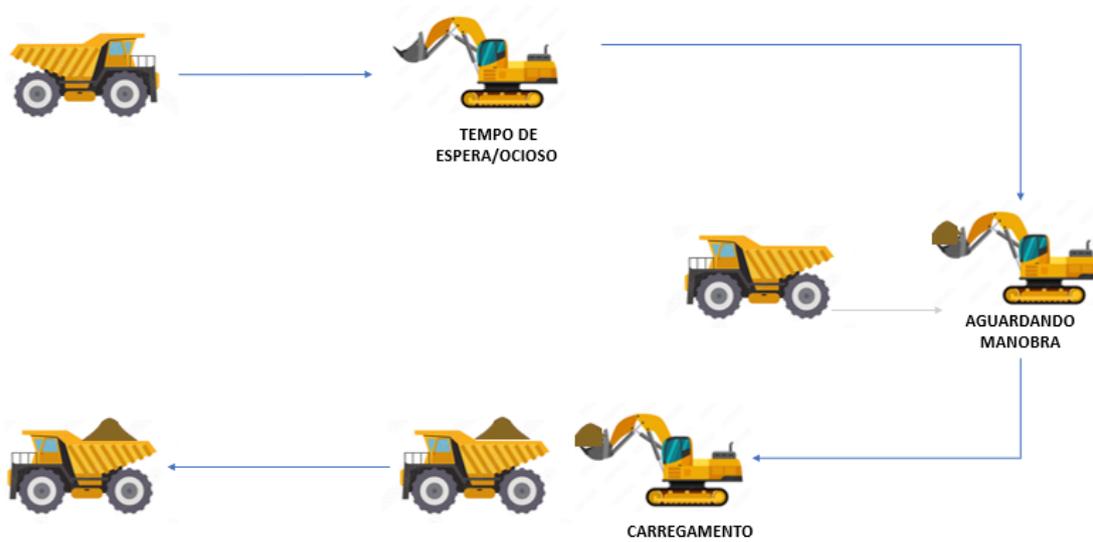
O carregamento compreende uma parcela significativa dos custos de operação, dessa forma sua eficaz realização é de fundamental importância para o ciclo de produção. Para que as operações de carregamento possam ocorrer com máxima eficiência, algumas condições devem estar totalmente adequadas à operação, tais como: máxima fragmentação da frente de lavra desmontada, praças de carregamento com larguras e nivelamento de piso ideais, bem como, a realização correta de manobra dos caminhões para o carregamento (COUTINHO, 2017).

O ciclo de carregamento de uma escavadeira (T_{CE}) consiste na soma dos seguintes tempos de trabalho: tempo de carregamento da caçamba (T_{CC}), tempo de rotação com a caçamba preenchida (T_{RP}), tempo de descarga (T_D) e tempo rotação com a caçamba vazia (T_{RV}), dessa forma o equipamento retorna à posição inicial e inicia o ciclo novamente (Racia, 2016). A Equação 4 apresenta o método de cálculo para o ciclo das escavadeiras.

$$T_{CE} = T_{CC} + T_{RP} + T_D + T_{RV} \quad (4)$$

Para Coutinho (2017) o ciclo de carregamento para as carregadeiras é descrito através das seguintes etapas de trabalho: avanço em direção ao material, recuo com a caçamba preenchida, avanço em direção ao equipamento de transporte, descarga do material e retorno. O ciclo de carregamento é apresentado pela Figura 5.

Figura 5 - Ciclo de carregamento



Fonte: Autor (2023).

2.4.3.2 Transporte

Segundo Coutinho (2017) um ciclo de produção composto por caminhões inicia-se na alocação dos equipamentos, onde ocorre a busca pela otimização do processo produtivo através da escolha de um modelo de alocação (dinâmica ou estática) que permita tornar o processo de produção o mais eficiente possível, sendo este processo determinado pelo sistema de despacho da empresa.

De acordo com Racia (2016) o tempo de ciclo de um caminhão (T_{CC}) é composto pela soma de outros cinco tempos de trabalho inseridos na operação de transporte, são eles: tempo de manobra e posicionamento (T_{MP}), tempo de carregamento (T_C), tempo de transporte cheio (T_{TC}), tempo de manobra e basculamento (T_{MB}) e tempo de transporte vazio (T_{TV}), a Equação 5 apresenta o cálculo para obtenção dos tempos de ciclo.

$$T_{CC} = T_{MP} + T_C + T_{TC} + T_{MB} + T_{TV}$$

(5)

Ainda segundo Racia (2016), para a obtenção do tempo de transporte cheio, faz-se necessário a determinação do número de passes (N) do equipamento de carregamento, bem como, dos tempos de transporte cheio e vazio. Os mesmos podem ser obtidos respectivamente através das relações entre o volume da caçamba do caminhão (V_{CC}) e da concha da escavadeira (V_{CE}), além da distância média de transporte entre os pontos de carga e descarga (DMT), da velocidade média com o caminhão cheio (V_{MC}) e com ele vazio (V_{MV}), conforme as Equações 6, 7, 8 e 9 apresentam.

$$T_C = T_{CE} \times N \tag{6}$$

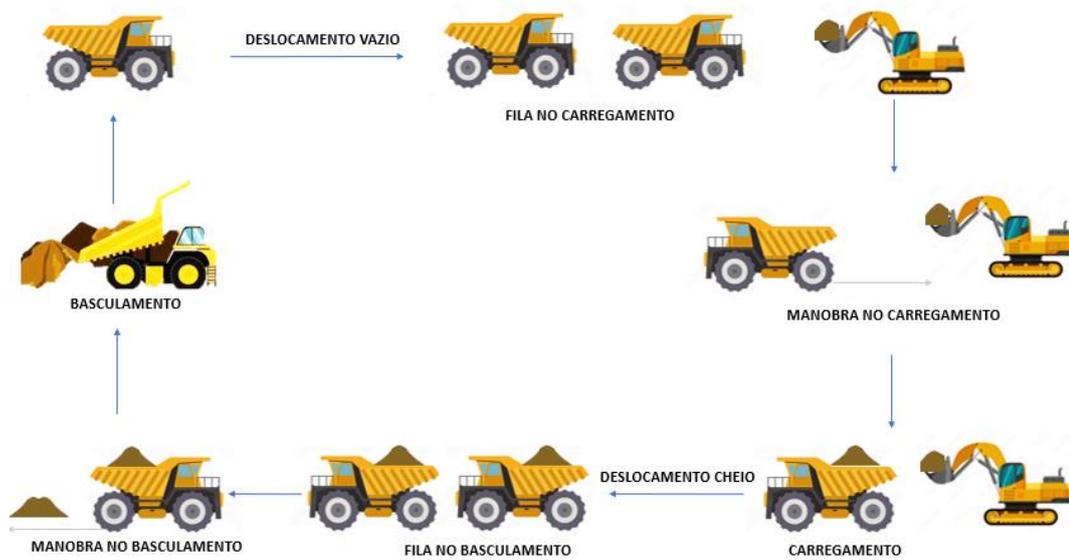
$$N = \frac{V_{CC}}{V_{CE}} \tag{7}$$

$$T_{TC} = \frac{V_{MC}}{DMT} \tag{8}$$

$$T_{TV} = \frac{V_{MV}}{DMT} \tag{9}$$

A Figura 6 apresenta o ciclo de atividades executado pelos caminhões.

Figura 6 - Ciclo de atividade dos caminhões



Fonte: Autor (2023).

2.5 SISTEMA DE DESPACHO ELETRÔNICO

Nas minerações a céu aberto o uso frequente de sistemas de gerenciamento de dados é cada vez mais comum, tendo vista à complexidade e quantidade dos dados trabalhados diariamente, bem como, o auxílio que os mesmos fornecem para o aumento e eficiência dos processos envolvidos.

De acordo com Costa (2011) o sistema de despacho eletrônico pode ser definido como um gerenciador dos equipamentos da mina, no qual é possível se obter as melhores decisões de alocação dos equipamentos de acordo com o cenário da mina. Com isso, a ferramenta possibilita obter redução dos custos operacionais, melhores índices de produtividade e consequentemente fazer com que os processos atinjam a máxima eficiência possível.

Em minas a céu aberto são utilizados dois modelos de alocação para caminhões, são eles: alocação dinâmica e alocação estática. Para a locação dinâmica dos caminhões é necessário um sistema de gerenciamento eletrônico da frota, no qual o

equipamento receberá um direcionamento específico para cada ponto de carregamento ou descarga, a depender do cenário atual da mina ou de recomendações pré-estabelecidas. Por outro lado, a alocação estática se refere à fixação dos equipamentos em relação a sua origem e seu destino, ou seja, são fixados os pontos de carregamento e de descarga de material para cada equipamento durante um determinado tempo (Rodrigues, 2006).

2.6 DIMENSIONAMENTO DE FROTA POR ÍNDICES OPERACIONAIS

O uso dos indicadores de produção para o dimensionamento e determinação da capacidade da frota apresentam um elevado nível de confiança, pois sua autenticidade está diretamente relacionada à aderência entre os indicadores estimados e os de fato realizados. Dessa forma, tem-se como fundamental a obtenção dos indicadores por meio de manuais de fabricantes, estudos de campo e avaliações que incidam sobre os dados históricos de produção realizados, a fim de se garantir maior proximidade entre a produção estimada e a realizada (Borges, 2013).

Segundo Amaral (2008) o processo de seleção dos equipamentos para uma operação em mina a céu aberto se dá forma única e não possui predefinições para um modelo. Cada mina tem suas características particulares em relação à disposição geográfica dos corpos de minério, a qualidade do material e ao clima presente, esses fatores são responsáveis por tornar cada processo de dimensionamento particular em cada mina e a seleção dos equipamentos necessários para as operações.

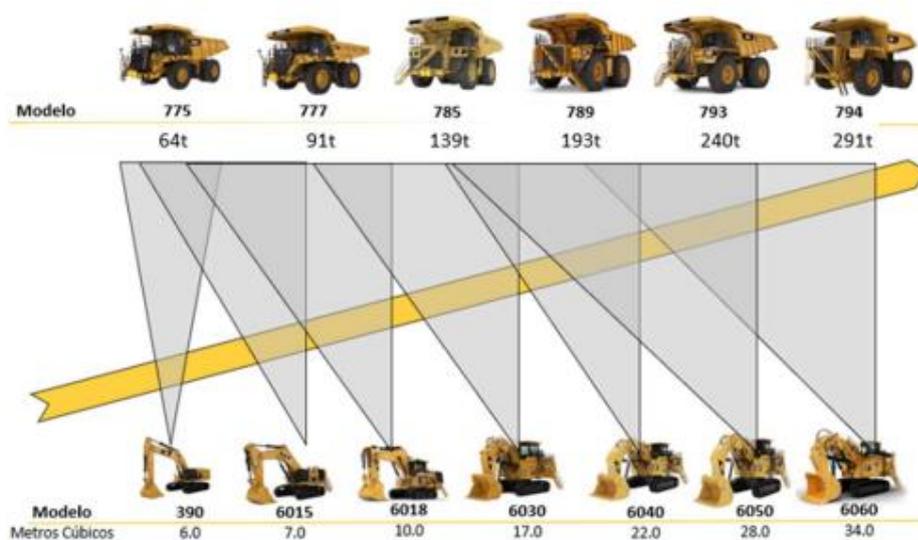
Conforme já apresentado, o número de passes realizado por um equipamento de carga é de extrema importância para o cálculo da produtividade dos equipamentos, dessa forma, para que ocorra uma operação conjugada eficiente e que otimize o tempo de ciclos dos equipamentos, o número de passes dos equipamentos de carga deve ser de 3 a 6 (PERONI, 2015).

A compatibilidade e adequação dos equipamentos para melhor performance das operações conjugadas é em geral disponibilizada por seus fabricantes, em formato de

guia para o dimensionamento e seleção dos equipamentos, no qual é possível se observar as ideais combinações entre carga e transporte.

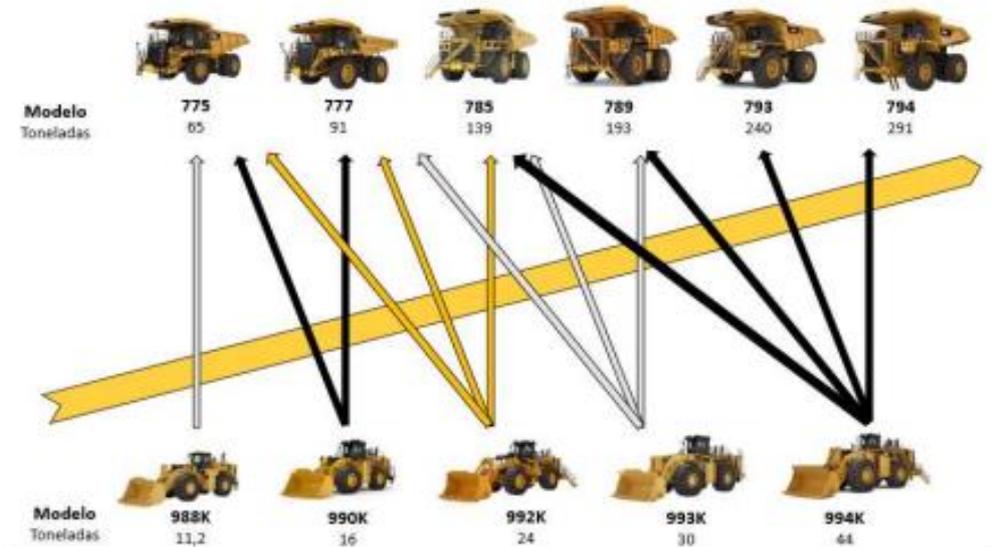
A Figura 7 e Figura 8 apresentam a compatibilidade e o arranjo ideal entre os equipamentos de carga e transporte indicados pela fabricante Caterpillar.

Figura 7 - Compatibilidade entre caminhões fora-de-estrada e escavadeiras hidráulicas.



Fonte: Caterpillar (2023).

Figura 8 - Compatibilidade entre caminhões fora-de-estrada e carregadeiras.



Fonte: Caterpillar (2023).

A partir do uso de indicadores, como: disponibilidade física (DF), taxa de utilização (UT), produtividade horária (PH), as horas trabalhadas (HT) e a massa total planejada (MP), pode-se estimar o número de equipamentos necessários para uma frota, bem como a capacidade de produção da mesma (BORGES, 2013).

As Equações 10, 11 e 12 e apresentam o formato de cálculo para a obtenção do total de horas trabalhadas, do número de equipamentos, bem como, da produção estimada para a frota segundo Borges (2013).

$$HT = \text{Horas Totais Programadas} \times DF \times UT \tag{10}$$

$$N_{equip} = \left(\frac{MP}{HT} \right) \times \frac{1}{PH} \tag{11}$$

$$\text{Produção} = DF \times UT \times PH \times HT \times N_{equip} \tag{12}$$

As horas totais programadas se referem as horas totais para um período, considerando que as operações trabalhem 24h/dia.

2.6.1 Substituição/Aquisição de Equipamentos

Durante as operações unitárias realizadas diariamente dentro das minas a céu aberto, tem-se um enorme esforço diário ao qual os equipamentos são submetidos constantemente, aliado a isso, todo equipamento possui uma estimativa de vida útil e perspectiva de redução de sua capacidade de operação, sendo necessário o acompanhamento do seu desempenho e a elaboração de um plano de substituição desses equipamentos em determinado momento.

De acordo com Castro (2019), para a definição do momento de substituição ou não de um equipamento existem duas análises distintas que devem ser estudadas, que são: o período de vida útil do equipamento e também a sua vida útil econômica.

Para Sousa Jr (2012), existem alguns fatores que são fundamentais para a análise de substituição, que são:

- **Desgaste do equipamento:** trata-se da redução da performance do equipamento devido ao desgaste físico causado pelo uso constante do equipamento.
- **Obsolescência:** refere-se ao fato de o equipamento realizar determinada operação com menor eficiência, em comparação a outro já disponível no mercado.
- **Financiamento:** possibilidade de aquisição de novos equipamentos devido a oportunidades econômicas de momento, exigindo adaptação de operações para suprir.
- **Exigências de Mercado:** necessidade de atendimento de novas demandas de produção do mercado.

Além disso, segundo Sousa Jr (2012), outros fatores como perspectiva externa de mercado, os custos de irreversíveis ou custos de reparação de equipamento, bem

como, impostos e dados de aquisição passados devem ser utilizados como base para a avaliação e criação de um plano de substituição/aquisição de equipamentos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os cálculos e observações realizados para a obtenção da produtividade dos equipamentos de carga e de transporte, bem como, da obtenção da capacidade de movimentação dos equipamentos e das respectivas frotas.

3.1 DIMENSIONAMENTO DA PRODUTIVIDADE

Neste tópico serão abordadas as metodologias de determinação dos indicadores, bem como, dos cálculos utilizados para a obtenção dos valores de produtividade dos equipamentos de carga e de transporte.

3.1.1 Equipamentos de Carregamento

A determinação da capacidade das frotas de carregamento e transporte para uma operação mineira se dá inicialmente através da determinação da produtividade média dos equipamentos.

Esse processo envolve diretamente a capacidade de carga, bem como, os tempos referentes aos desempenhos operacionais inseridos no ciclo total de operações dos equipamentos.

Para os equipamentos de carregamento, a produtividade horária pode ser obtida a partir da Equação 13.

$$PH = \frac{60}{TC} \times CM$$

(13)

Onde:

PH: Produtividade Horária dos Equipamentos

TC: Tempo de Ciclo dos Equipamentos

CM: Carga Útil dos Equipamentos de Transporte

Para os equipamentos de carregamento como as escavadeiras e as carregadeiras tem-se os seguintes tempos associados ao tempo de ciclo:

- Tempo de Espera/Ociosidade: refere-se ao tempo em que o equipamento permanece inativo entre as etapas de operação do processo de produção.
- Aguardando Manobra: refere-se ao tempo no qual o equipamento de carga está inativo aguardando o equipamento de transporte realizar a manobra para se posicionar de forma segura e ficar apto à etapa de carregamento.
- Tempo de Carregamento: refere-se ao tempo no qual a caçamba do equipamento de carga entra em contato com o material e tem seu interior completamente preenchido, sendo levantada e iniciando o processo de carregamento do equipamento de transporte até o preenchimento completo de sua caçamba.

3.1.1.1 Escavadeiras

Para a realização dos cálculos de produtividade da frota de escavadeiras foram utilizados os dados de ciclo de operações fornecidos pelo sistema de despacho eletrônico da empresa. O tempo de ciclo total dos equipamentos pôde ser obtido através da soma dos respectivos valores de tempo de espera, aguardando manobra e tempo de carregamento.

Na Tabela 1 estão indicados os tempos de ciclo total para a frota de escavadeiras CAT6060, no qual foram obtidos através da soma entre os tempos médios referentes ao ano de 2022 e fornecidos pelo sistema de despacho eletrônico da empresa.

Tabela 1 - Tempos de ciclo total para a frota de escavadeiras CAT6060.

Indicadores (min)	CAT 6060
Tempo de Espera	2,10
Aguardando Manobra	0,25
Tempo de Carregamento	2,89
Tempo de Ciclo	5,24

Fonte: Autor (2023).

Com a obtenção dos tempos de ciclo total dos equipamentos e com o valor de carga média de 240 toneladas para os equipamentos de transporte, valor esse também fornecido pelo sistema de despacho eletrônico da empresa, posteriormente foi calculado por meio da Equação 13 o valor de produtividade horária para a frota de escavadeiras, no qual é apresentado pela Tabela 2.

Tabela 2 - Produtividade horária para a frota de escavadeiras.

Frota	Produtividade Horária (t/h)
CAT6060	2.750

Fonte: Autor (2023).

A produtividade obtida será posteriormente utilizada como base para o dimensionamento da capacidade da nova frota e por fim da capacidade total de carregamento para cada ano do plano

3.1.1.2 Carregadeiras

A frota atual de carregadeiras tem o fim de suas operações previsto para o ano de 2027, ou seja, no ano anterior ao início do plano de exaustão em 2028. Logo, o dimensionamento da nova frota se deu baseado nos equipamentos da frota anterior.

Para a frota de carregadeiras utilizou-se a mesma metodologia de cálculo descrita anteriormente para as escavadeiras e os dados também foram disponibilizados pelo sistema de despacho eletrônico, no qual a Tabela 3 descreve os valores de ciclo para as carregadeiras da frota 994H.

Tabela 3 - Tempo de ciclo para as carregadeiras da frota 994H.

Indicadores(min)	994H
Tempo de Espera	2,48
Aguardando Manobra	0,25
Tempo de Carregamento	4,29
Tempo de Ciclo	7,02

Fonte: Autor (2023).

Utilizando a Equação 13 e o mesmo valor de carga média, de 240 toneladas, foi obtido o valor de produtividade para as carregadeiras, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Produtividade horária para a frota de carregadeiras.

Frota	Produtividade Horária (t/h)
994H	2.050

Fonte: Autor (2023).

3.1.2 Equipamentos de Transporte

O dimensionamento da capacidade da frota de transporte também se dá de modo similar ao realizado para a frota de carregamento, no qual são utilizados os valores de tempo de ciclo total e de carga média, também foi utilizada a Equação 13 para o cálculo. Um índice fundamental para o cálculo da produtividade dos equipamentos de transporte é a DMT, a mesma será utilizada para a determinação do tempo de trajeto total que compõe o tempo de ciclo total dos equipamentos de transporte.

Os equipamentos de transporte presentes na mineradora em estudo são os modelos CAT 793D e CAT 793F, da fabricante Caterpillar. As versões não possuem diferenças significativas de desempenho ou de capacidade, sendo abordadas da mesma forma, considerando a existência de uma frota única.

No próximo tópico será abordada a metodologia de cálculo para a determinação da distância média de transporte ao longo dos anos do plano.

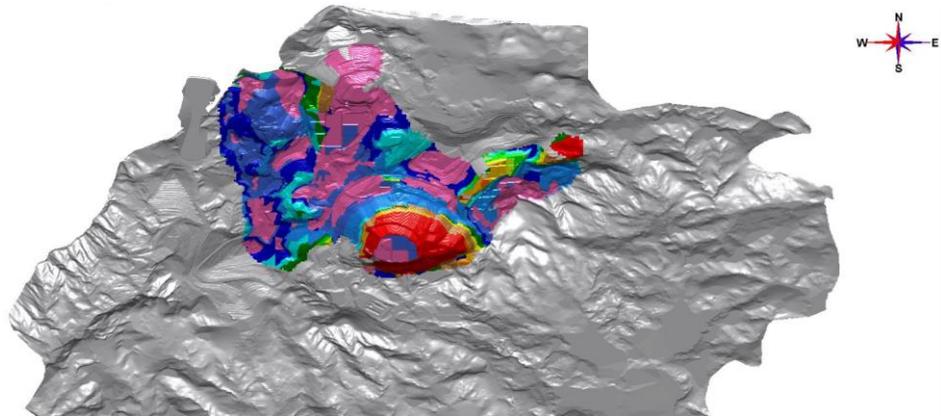
3.1.2.1 Cálculo da Distância Média de Transporte

A definição da distância média de transporte para o plano se deu inicialmente com a determinação dos pontos de origem e destino determinados de acordo com o plano de lavra.

Os pontos de origem foram definidos pelos centros de massa que foram inseridos em cada um dos sólidos de lavra definidos pelo sequenciamento para o plano de exaustão.

A Figura 9 apresenta os sólidos em geral para todo o plano de exaustão. Para o sequenciamento e criação dos sólidos de lavra para o plano, a empresa utilizou o software Mine Sight 3D.

Figura 9 - Sólidos definidos para o plano de exaustão

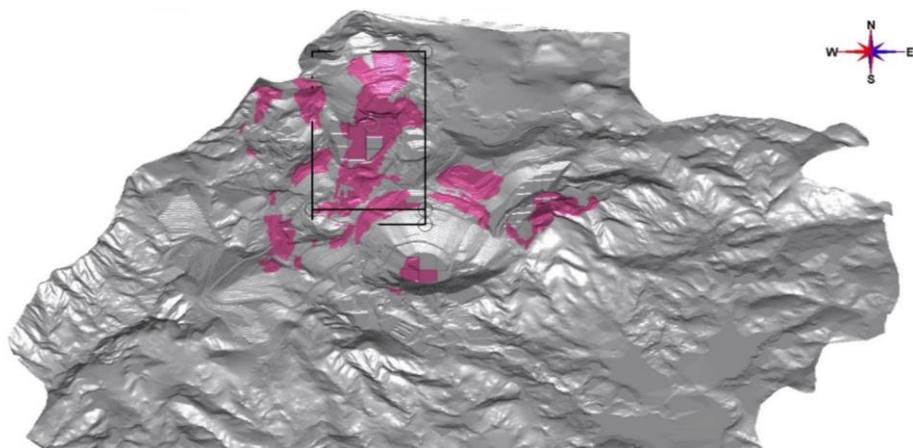


Fonte: Autor (2023).

Cada um dos sólidos gerados para cada ano do plano é composto por pequenos sólidos que representam cada corpo mineralizado presente na área de lavra e esses corpos denominam as suas respectivas regiões.

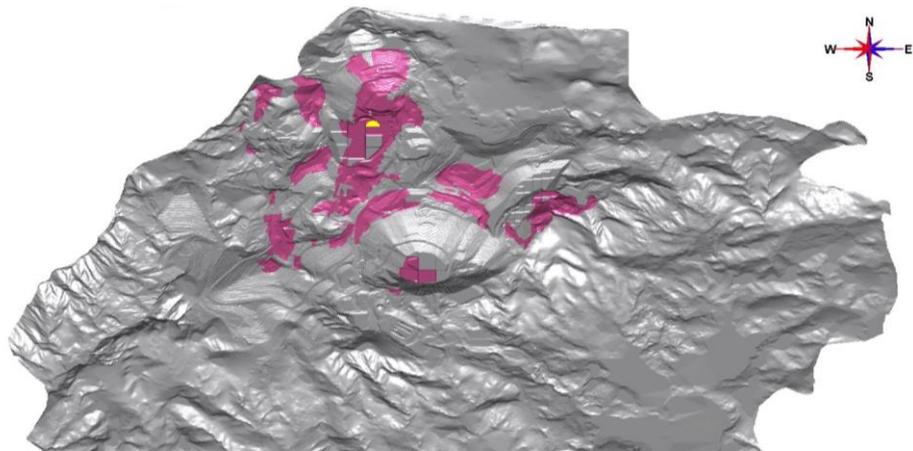
Desta forma, para cada ano do plano foram determinados os centros de massa de cada sólido correspondente a cada região. As Figuras 10 e 11 apresentam o sólido de massa correspondente a uma região da área de lavra e em seguida seu respectivo centro de massa determinado.

Figura 10 - Sólido correspondente a uma região da área de lavra.



Fonte: Autor (2023).

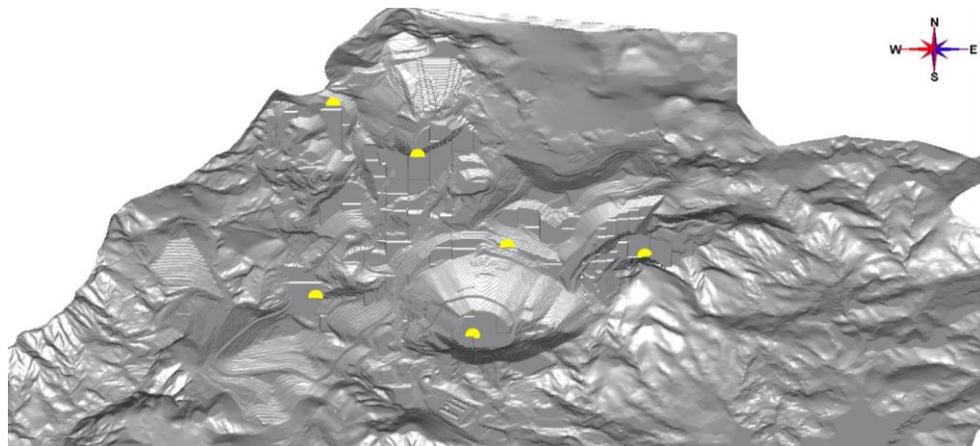
Figura 11 - Centro de massa determinado para o sólido de lavra.



Fonte: Autor (2023).

Realizou-se o processo anterior para todos os sólidos inseridos nos sólidos totais, determinando assim os respectivos centros de massa de todas as regiões de origem. A Figura 12 apresenta os respectivos centros de massa para cada ponto de origem.

Figura 12 - Centros de massa para cada ponto de origem obtidos para o ano de 2028.



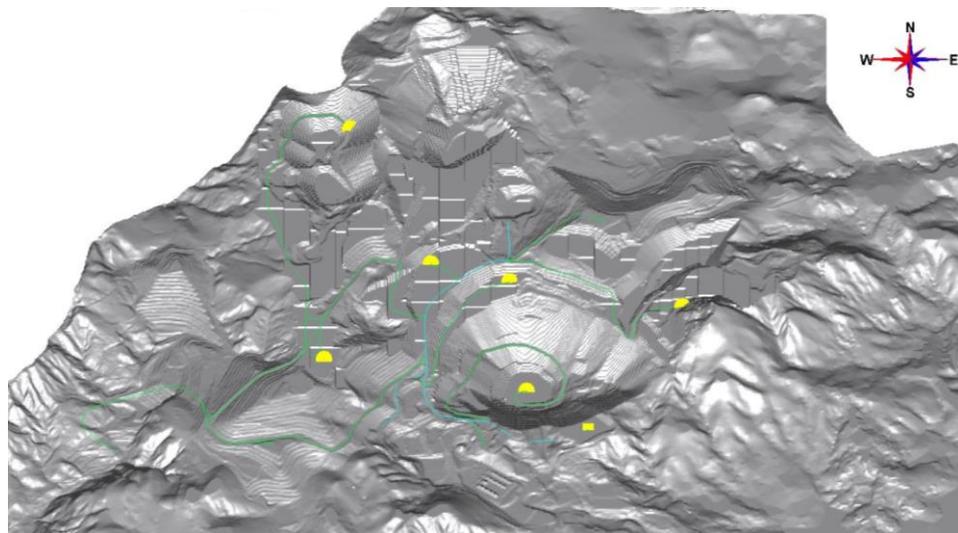
Fonte: Autor (2023).

Em relação aos pontos de destino, esses foram definidos de acordo com a finalidade do material, ou seja, os destinos se referem as pilhas de estoque de baixo teor, as plantas de beneficiamento, ao sistema de processamento à seco e a uma

operação de lavra conjunta com outra empresa, no qual ocorre a lavra e em seguida a deposição do material em uma área específica para esta empresa.

A partir disso foram traçadas linhas que representavam o trajeto dos materiais e com isso foram mensuradas as distâncias entre os pontos de origem e destino. A Figura 13 descreve as linhas de trajeto desenhadas para mensurar as distâncias.

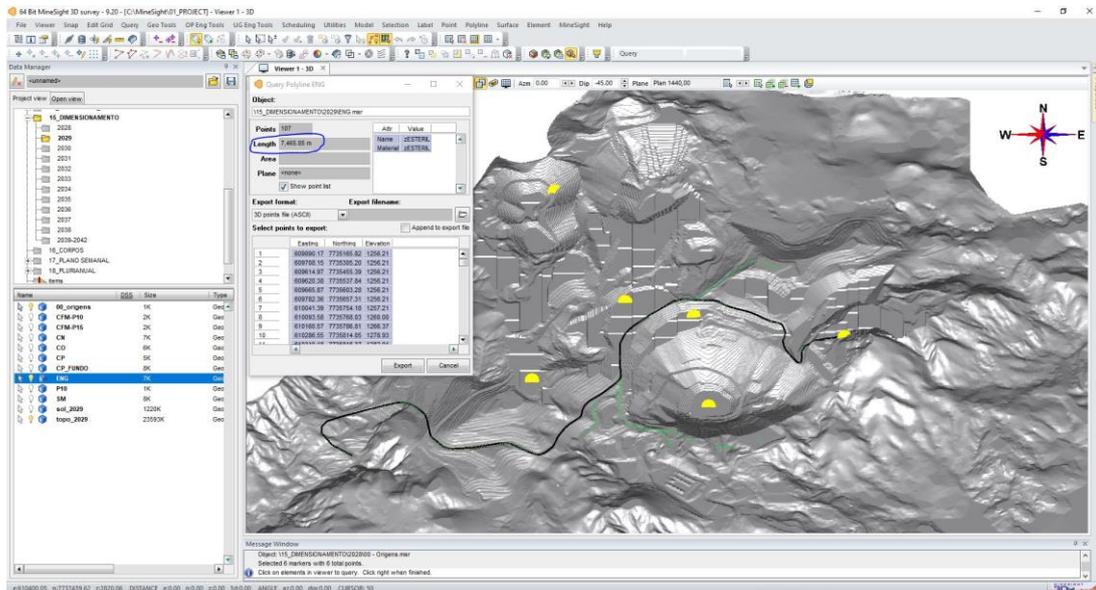
Figura 13 - Linhas de trajeto traçadas para as origens e destinos do ano de 2029.



Fonte: Autor (2023).

Aliado a isso, a Figura 14 apresenta uma das distâncias obtidas. Estes processos foram realizados para cada um dos anos do plano, no qual estão representados pelos Anexo A ao Anexo L.1.

Figura 14 - Distância média de transporte obtida entre uma origem e um destino no ano de 2029.



Fonte: Autor (2023).

Com a obtenção dos dados de distância entre origem e destino para os anos do plano, foi posteriormente calculada a DMT representativa para o ano e a DMT final para os anos, no qual foi utilizado o software Microsoft Excel para disposição dos dados e realização dos cálculos. Para isso, foram utilizados os respectivos valores de massa a serem movimentados de cada origem para cada destino conforme pode ser observado no Anexo M.

Deste modo, inicialmente calculou-se a média ponderada para a DMT referente a cada destino para seu respectivo ano e em seguida foi calculada a DMT final para cada ano através da média ponderada entre o total de movimentação previsto para o ano e os valores obtidos para cada destino.

A Equação 14 descreve o método utilizado tanto para os valores para cada destino, quanto para o cálculo do valor total geral de cada ano.

$$\bar{x}_p = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \times DMT_i}{\sum_{i=1}^N m_i}$$

(14)

Onde:

DMT_i: Distância média de transporte determinada entre cada origem e destino.

M_i: Massas estabelecidas pelo sequenciamento.

Desta forma, foram obtidos os seguintes valores de distância média de transporte para cada ano do plano apresentado nas tabelas abaixo, a Tabela 5 descreve a DMT em quilômetros, obtida a partir de 2028 até 2031.

Tabela 5 - DMT média entre origem e destino e DMT Total para os anos de 2028 a 2031 do plano.

Origens Ano a Ano	DMT (km)									
	Pilha de Estéril	Planta Central	Pilha 1	Pilha 2	P10	P15	P28	Sistema a Seco	Empresa X	Total Geral
2028	5,55	3,43	2,11	2,63	4,50	3,70	0,00	2,18	4,07	4,01
CN	5,13	3,29	1,56	1,56	3,96	3,03		2,13	4,07	3,26
CO	2,91	3,50	3,30	3,30	4,19	3,24		3,87		3,30
CP	6,11	2,57	3,67	3,67	3,27	2,45		4,24		5,37
CP_FUNDO	7,52	2,85	5,08	5,08	3,35	3,86		5,65		3,35
ENG	8,00	4,93	2,87	2,87	5,62	4,66		3,35		4,31
SM	5,33	5,65	5,45	5,45	6,33	5,38		6,02	4,28	5,41
2029	5,60	3,90	5,02	5,55	4,77	3,45	0,00		4,67	4,71
CN	5,55	2,00	1,13	1,13	2,96	2,05		1,70	4,49	2,41
CO	2,87	3,63	3,43	3,43	4,35	3,37		4,00		3,30
CP	5,73	2,19	3,29	3,29	2,83	2,07		3,90		3,95
CP_FUNDO	7,69	3,01	5,24	5,24	3,52	4,04		5,81		3,36
ENG	7,46	4,38	2,32	2,32	5,07	4,11		2,81		4,71
SM	5,73	6,04	5,84	5,84	6,72	5,79		6,41	4,67	5,89
Retomado					3,48	2,54				2,74
2030	5,02	3,58	3,00	2,85	4,73	3,76	4,31		3,32	4,32

CN	5,05	2,88	1,75	1,75	3,57	2,60	3,99		3,93	3,90
CO	3,46	4,32	3,19	3,19	5,02	4,05	3,29			3,71
CP	6,58	3,30	1,43	1,43	3,99	3,02	5,52			6,18
CP_FUNDO	9,85	3,12	5,44	5,44	3,72	4,22	9,58			3,62
ENG	7,93	4,65	2,78	2,78	5,35	4,38	6,88			5,78
SM	4,43	4,51	3,39	3,39	5,21	4,24	2,82		3,32	4,26
Retomado					3,49	2,52	5,02			4,59
2031	4,72	2,96	2,81	2,76	3,65	2,61	4,39	2,71	0,00	3,89
CN	3,80	2,71	2,12	2,12	3,41	2,44	3,80	2,12		3,24
CO	3,21	1,67	2,74	2,74	2,36	1,39	3,21	2,74		2,44
CP	5,04	2,25	3,68	3,68	2,95	1,98	5,04	3,68		4,49
ENG	6,92	4,40	2,54	2,54	5,10	4,13	6,92	2,60		5,78
SM	3,20	3,06	3,48	3,48	3,75	2,78	3,20	4,12		3,19
Retomado		2,78			3,47	2,51	4,54			3,39

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 6 descreve os valores para o período de 2032 a 2035.

Tabela 6 - DMT média entre origem e destino e DMT Total para os anos de 2032 a 2035 do plano.

Origens Ano a ano	DMT (km)									
	Pilha de Estéril	Planta Central	Pilha 1	Pilha 2	P10	P15	P28	Sistema a Seco	Empresa X	Total Geral
2032	4,91	2,66	2,31	4,49	3,51	2,45	3,44	2,77	3,26	3,77
CN	5,18	3,05	1,76	1,76	3,74	2,77	4,03	0,97		4,37
CO	3,13	1,70	3,61	3,61	2,39	1,42	2,98	2,82		2,41
CP	5,23	1,21	5,02	5,02	1,89	2,01	5,09	4,23		3,29
ENG	6,88	4,76	0,41	0,41	5,44	4,47	5,74	2,26		5,85
SM	4,37	3,27	5,09	5,09	3,95	2,98	3,32	2,48	3,26	3,68
Retomado		4,37			3,64	4,62	5,60			4,86
2033	5,12	2,62	2,93	2,88	2,89	1,97	4,01	3,33	3,21	3,87
CN	5,52	3,00	1,83	1,83	3,69	2,74	3,90	1,34		4,29
CO	3,23	1,69	3,11	3,11	2,38	1,42	4,55	3,43		2,78
CP	6,60	2,17	1,22	1,22	1,03	3,21	6,94	1,36		5,65
ENG	7,64	5,12	0,58	0,58	5,80	4,85	6,01	1,55		6,79
SM	5,37	2,85	3,11	3,11	3,35	2,58	2,67	2,62	3,21	4,14
Retomado		3,39			2,26	4,43	5,50			4,43
2034	2,93	3,15	3,15	3,11	3,59	2,44	2,97	3,18	4,68	2,99
CN	5,47	2,95	1,67	1,67	3,64	2,68	3,94	1,96		3,97
CO	3,37	1,72	3,76	3,76	2,41	1,45	4,69	3,28		2,50
CP	4,42	1,90	2,21	2,21	2,56	1,63	3,63	1,76		3,62

ENG	5,74	4,43	0,37	0,37	5,12	4,17	6,96	1,12		5,46
SM	2,67	3,31	3,11	3,11	4,00	3,04	2,66	2,66	4,68	2,90
Retomado		3,37			2,25	4,41	5,42			4,25
2035	3,39	2,70	2,92	2,50	3,04	2,18	2,95			2,97
CO	3,43	1,72	2,73	2,73	2,41	1,48	3,31			2,67
CP	4,31	2,20	1,87	1,87	2,89	1,97	3,69			3,90
ENG	5,75	4,35	0,44	0,44	2,55	4,12	5,75			5,21
SM	2,61	2,96	3,01	3,01	3,65	2,72	2,61			2,81
Retomado		3,73			2,25	4,41	5,44			4,11

Fonte: Autor (2023).

Para os últimos anos do plano foram obtidos os valores da Tabela 7. Em decorrência do sequenciamento realizado, gerou-se apenas um sólido de lavra para o último quadriênio do plano e com isso foram determinados os mesmos valores de DMT para os últimos 4 anos.

Tabela 7 - DMT média em quilômetros entre origem e destino e DMT Total para os anos de 2036 a 2042 do plano.

Origens Ano a ano	DMT (km)									
	Pilha de Estéril	Planta Central	Pilha 1	Pilha 2	P10	P15	P28	Sistema a Seco	Empresa X	Total Geral
2036	5,10	1,35	3,53	2,06	2,64	2,05	3,57	0,00	4,48	3,52
CO	3,68	1,97	2,62	2,62	2,21	1,32	3,59			2,62
CP_1	4,97	1,97	1,37	1,37	3,49	2,60	4,87			4,66
CP_2	7,29	2,00	1,12	1,12	1,40	3,66	7,20			6,60
ENG	6,24	3,86	0,50	0,50	2,61	4,87	8,41			5,89
FN	5,55	3,20	4,70	4,70	4,67	3,77	3,58		4,48	5,07
SM	4,53	2,89	3,69	3,69	3,64	2,76	2,58			2,53
Retomado		3,35			2,22	4,35	5,85			4,15
2037	5,63	2,31	0,00	0,00	4,40	3,88	4,28	0,00	4,65	4,36
CP	5,51	1,85			4,61	3,72	4,98			4,68
ENG	6,27	4,21			2,70	4,18	5,74			5,13
FINAL	5,72	3,12			4,81	3,93	3,88		4,65	4,64
SM	4,42	2,96			3,54	2,66	2,61			3,39
Retomado		3,14			2,07	4,38	5,88			4,43
2038	5,32	3,09	2,20	2,20	3,11	2,99	3,48	1,51	3,94	4,04
CP	6,45	1,77	1,63	1,63	0,52	2,30	6,40	1,75		5,45
ENG	8,40	4,16	0,38	0,38	2,47	4,25	8,36	1,09		6,65

FINAL	4,46	3,06	2,20	2,20	3,44	2,55	3,25	2,02	3,94	3,57
Retomado		2,97					5,47			4,22
2039-2042	4,72	2,75	0,00	0,00	3,66	3,12	4,60	1,17	0,00	4,15
CP	4,94	1,90			0,87	2,25	6,78	1,15		4,55
ENG	6,67	4,23			2,60	4,41	8,65	1,34		5,05
FINAL	4,35	3,15			4,19	2,67	3,43	2,06		3,78
Retomado		3,24					5,73			4,49

Fonte: Autor (2023).

Dessa forma, se obteve a configuração final para as distâncias médias de transporte ao longo dos anos do plano, apresentada pela Tabela 8.

Tabela 8 - Distância média final de transporte para os anos do plano.

Ano	DMT Final (Km)
2028	4,01
2029	4,71
2030	4,32
2031	3,89
2032	3,77
2033	3,87
2034	2,99
2035	2,97
2036	3,52
2037	4,36
2038	4,04
2039-2042	4,15

Fonte: Autor (2023).

Após a definição da DMT para o cálculo da produtividade dos equipamentos de transporte deve-se determinar o tempo de ciclo total dos equipamentos, método que será abordado a seguir.

3.1.2.2 Tempo de Ciclo Total

O tempo de ciclo total pode ser definido como a soma entre os tempos que envolvem o ciclo de operação de um equipamento. Para a determinação do valor do tempo de ciclo total dos equipamentos de transporte, também foram utilizados os índices de operações fornecidos pelo sistema de despacho eletrônico da empresa. Os índices que compõem o tempo de ciclo total dos equipamentos de transporte são:

- Tempo de Fila no Carregamento: é o tempo em que um equipamento de transporte aguarda em fila, enquanto outro equipamento está sendo carregado.
- Tempo de Fila no Basculamento: refere-se ao tempo em que um equipamento de transporte aguarda em fila enquanto outro equipamento está descarregando o material.
- Tempo de Basculamento: é o tempo necessário para que um equipamento de transporte descarregue completamente o material contido em sua caçamba.
- Tempo de Carregamento: refere-se ao tempo necessário para que a caçamba do caminhão seja completamente carregada após o equipamento de carga iniciar o processo de carregamento.
- Tempo de Manobra no Carregamento: refere-se ao tempo necessário para o equipamento de transporte executar a manobra e se posicionar corretamente em relação ao equipamento de carga para receber o material.
- Tempo de Manobra no Basculamento: é o tempo necessário para que o equipamento de transporte execute as manobras antes, durante e após o processo de descarga de material.
- Aguardando Carga: refere-se ao tempo em que o equipamento de transporte, após terminar de executar a manobra, aguarda o carregamento. Se o equipamento de carga já estiver pronto este tempo é zero, se ele ainda está enchendo a caçamba este tempo é contabilizado como aguardando carga.

- **Aguardando Basculamento:** refere-se ao tempo em que o equipamento de transporte após executar a manobra de basculamento ainda tem que aguardar para realizar a descarga do material devido a uma recomendação da britagem.

Para o cálculo do tempo de ciclo total utilizou-se o valor médio dos tempos anteriormente citados, no qual se referem ao ano de 2022. Sendo assim, esses valores foram utilizados para todos os anos do plano, sendo os mesmos fornecidos pelo sistema de despacho eletrônico da empresa. A Tabela 9 descreve os valores utilizados.

Tabela 9 - Tempo médio por ciclo.

Índices de tempo que compõem o Tempo de Ciclo Total	Tempo médio por ciclo (min)
Tempo de Fila no Carregamento	2,54
Tempo de Fila no Basculamento	0,60
Tempo de Carregamento	3,53
Tempo de Basculamento	1,04
Tempo de Manobra no Carregamento	0,25
Tempo de Manobra no Basculamento	0,25
Aguardando Carga	0,05
Aguardando Basculamento	0,35

Fonte: Autor (2023).

Além disso, outro componente necessário para o cálculo do tempo de ciclo total dos equipamentos de transporte é o tempo total de trajeto. Esse índice refere-se ao tempo em que o equipamento de transporte necessita para realizar o trajeto entre a origem e o seu destino.

Para a determinação do tempo total de trajeto, é necessário o conhecimento da velocidade média do equipamento cheio e vazio, bem como, a distância média de transporte do equipamento cheio e vazio.

Os valores de velocidade média do equipamento cheio e vazio também foram fornecidos pelo sistema de Despacho Eletrônico. Por se tratarem da média dos valores de velocidade para um ciclo completo de operação do equipamento, utilizou-se os

mesmos valores para todos os anos do plano, sendo 18,9 km/h para a velocidade média do equipamento cheio e 26,0 km/h para a velocidade média do equipamento vazio. Para os valores de DMT para o equipamento cheio e vazio, também necessários para o cálculo, foram utilizados os valores de DMT Final obtidos anteriormente.

Com isso, utilizou-se a Equação 15 para a determinação do tempo de trajeto total dos equipamentos de transporte ao longo do plano.

$$TT = \left(\left(\frac{DMT_C}{VC} \right) + \left(\frac{DMT_V}{VV} \right) \right) \times 60 \quad (15)$$

Onde:

TT: Tempo total de trajeto em minutos.

DMT_C: DMT para o equipamento cheio.

DMT_V: DMT para o equipamento vazio.

VC: Velocidade média para o equipamento cheio.

VV: Velocidade média para o equipamento vazio.

Dessa forma foram obtidos os seguintes valores de tempo de trajeto total para os equipamentos de transporte, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Tempo de trajeto total para os equipamentos de transporte.

Ano	Tempo Total de Trajeto (min)
2028	22,02
2029	25,86
2030	23,72
2031	21,36
2032	20,70

2033	21,25
2034	16,42
2035	16,31
2036	19,33
2037	24,16
2038	22,18
2039 - 2042	22,79

Fonte: Autor (2023).

Com a obtenção dos valores do tempo total de trajeto dos equipamentos e dos demais índices já citados, foram determinados os tempos de ciclo total dos equipamentos de transporte ao longo dos anos do plano, conforme descreve a Tabela 11.

Tabela 11 - Tempos de ciclo total dos equipamentos de transporte.

Ano	Tempo de Ciclo Total (min)
2028	30,63
2029	34,47
2030	32,33
2031	29,97
2032	29,31
2033	29,86
2034	25,03
2035	24,92
2036	27,94
2037	32,77
2038	30,79
2039 - 2042	31,40

Fonte: Autor (2023).

Desta forma utilizando a Equação 13, os valores de tempo de ciclo total e de carga média dos equipamentos, foram obtidos os valores médios de produtividade dos equipamentos de transporte ao longo dos anos do plano, no qual são descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Produtividade dos equipamentos de transporte.

Ano	Produtividade (t/h)
2028	470
2029	418
2030	445
2031	480
2032	491
2033	482
2034	575
2035	578
2036	515
2037	439
2038	468
2039 - 2042	459

Fonte: Autor (2023).

3.2 MODELO DE AQUISIÇÃO/SUBSTITUIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Após o cálculo da produtividade dos equipamentos, inicia-se então o estudo sobre o tempo de uso dos equipamentos, no qual se tem a projeção da redução da sua capacidade produtiva ao longo dos anos até o fim de sua vida útil, através disso é possível determinar a necessidade de aquisição ou não de novos equipamentos ao longo dos anos para manutenção da capacidade da frota.

Essa determinação se dá através da análise e projeção do avanço do horímetro dos equipamentos em função da queda da disponibilidade física dos mesmos ao longo dos anos, e também de sua utilização.

A vida útil dos equipamentos estudados foi determinada pela equipe de manutenção da empresa, através da determinação da vida econômica do ativo pelo método CAUE (Custo Anual Uniforme Equivalente), além disso, foram determinados os valores de disponibilidade física para os equipamentos de carregamento e transporte até o atingimento de sua vida útil. Esses valores foram determinados pela

equipe de manutenção da empresa de acordo com a quantidade de componentes a serem substituídos somada ao percentual de aumento de manutenção corretiva dos equipamentos ao longo dos anos.

3.2.1 Horímetro dos Equipamentos de Carregamento

Para cada frota de equipamento de carregamento foram utilizadas diferentes curvas de disponibilidade física fornecidas pela equipe de manutenção da empresa. A seguir serão apresentados os métodos e cálculos utilizados para a obtenção das frotas de escavadeiras e de carregadeiras.

3.2.1.1 Escavadeiras

Para a frota de escavadeiras foi fornecido pela equipe de manutenção da empresa a estimativa da disponibilidade física dos equipamentos em relação ao avanço do número de horas trabalhadas pelos mesmos, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Disponibilidade física dos equipamentos.

Intervalo de Horas Trabalhadas		DF
0	4.500	84,0%
4.501	9.000	82,0%
9.001	13.500	79,0%
13.501	18.000	76,0%
18.001	22.500	75,0%
22.501	27.000	75,0%
27.001	31.500	75,0%
31.501	36.000	74,0%
36.001	40.500	74,0%

40.501	45.000	74,0%
45.001	49.500	73,0%
49.501	54.000	73,0%
54.001	58.500	72,0%
58.501	63.000	72,0%
63.001	67.500	71,0%
67.501	72.000	71,0%
72.001	76.500	70,0%
76.501	81.000	70,0%

Fonte: Autor (2023).

Além disso, foram disponibilizados também os valores referentes ao total de horas trabalhadas dos equipamentos de carga, visando estipular o período em que os mesmos atingissem o final da vida útil. A Tabela 14 apresenta os valores das frotas de escavadeiras PC5500 e CAT 6060 fornecidos.

Tabela 14 - Disponibilidade física dos equipamentos.

Equipamento	Frota	Horas Trabalhadas Totais
ES-5501	PC5500	70.571
ES-5502	PC5500	73.681
ES-5503	PC5500	77.214
ES-5504	PC5500	73.146
ES-5505	PC5500	64.245
ES-6001	CAT6060	32.339
ES-6002	CAT6060	34.755
ES-6003	CAT6060	34.396
ES-6004	CAT6060	31.901

Fonte: Autor (2023).

A partir disso, utilizando-se o software Microsoft Excel foi criada uma fórmula condicional para projetar o aumento das horas trabalhadas dos equipamentos ano após ano, e também de sua disponibilidade física.

O método se deu através da utilização da função SE, no qual, a mesma foi usada para realizar diversas verificações condicionais para determinar o valor a ser retornado.

Inicialmente ela verifica a entrada ou não dos dados em uma célula, caso a célula esteja vazia o resultado será uma célula vazia, caso contrário ela continua para as próximas condições. Em seguida é realizada a mesma verificação para verificar se o valor inserido é igual a zero, neste caso o resultado também seria uma célula vazia, caso contrário parte-se para as próximas verificações.

Em seguida a função verifica se quantidade de horas inseridas para o equipamento está acima do máximo de horas estimadas para a vida útil do equipamento, caso esteja, não há soma de horas trabalhadas ao horímetro do equipamento, caso contrário é adicionado a quantidade de horas ao horímetro do equipamento. Este processo utiliza a disponibilidade física da Tabela 13 de acordo com o respectivo intervalo ao qual pertence a quantidade de horas do equipamento, utilizando um fator de utilização fixo de 55%, já utilizado pela empresa.

Essa etapa se repete até que o equipamento atinja o limite de horas estimado, para as escavadeiras foi utilizado um limite de 80.000 horas, sendo este fornecido pela equipe de manutenção e definido como o tempo de vida útil dos equipamentos. Após atingir o máximo de horas para os equipamentos, a função encerra as verificações e assim, tem-se o ano de encerramento das atividades dos equipamentos. Com isso, tem-se a quantidade de equipamentos disponíveis para o ano e a quantidade a ser substituída. A configuração das tabelas utilizadas para a determinação da substituição dos equipamentos de carregamento e de transporte, pode ser visualizada entre os Anexos N e O.

3.2.1.2 Carregadeiras

Para a determinação da substituição das carregadeiras, realizou-se o processo de forma idêntica ao efetuado anteriormente para as escavadeiras, com exceção para o

fator fixo de utilização utilizado que foi de 60%, para o intervalo de horas trabalhadas e para os respectivos valores de disponibilidade física fornecidos, que pode ser observado na Tabela 15. Para as carregadeiras, o limite de horas fornecido pela equipe de manutenção tinha seu máximo em 50.000 horas.

Tabela 15 - Disponibilidade física das carregadeiras.

Intervalo de Horas Trabalhadas		DF
0	4.500	84,0%
4.501	9.000	83,0%
9.001	13.500	81,0%
13.501	18.000	79,0%
18.001	22.500	77,0%
22.501	27.000	76,0%
27.001	31.500	75,0%
31.501	36.000	74,0%
36.001	40.500	74,0%
40.501	45.000	73,0%
45.001	49.500	73,0%

Fonte: Autor (2023).

Além disso, foram fornecidos também os horímetros referentes as carregadeiras, apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Total de horas trabalhadas das carregadeiras.

Equipamento	Frota	Horas Trabalhadas Totais
PM-9905	994H	36.429
PM-9906	994H	30.586
PM-9907	994H	35.211
PM-9908	994H	28.785
PM-9909	994H	31.535
PM-9910	994H	29.944

Fonte: Autor (2023).

A partir disso utilizando o Microsoft Excel foi possível estimar o declínio da DF em função do aumento de horas trabalhadas até próximo ao limite estabelecida e dessa forma estabelecer o período no qual serão necessárias as substituições das carregadeiras.

3.2.2 Horímetro dos Equipamentos de Transporte

Na mineradora em estudo, existem duas frotas de caminhões a frota CAT 793D e a frotas CAT 793F que se dividem em série I e II. Para determinar a substituição dos equipamentos, as frotas foram abordadas separadamente e conseqüentemente os índices de estimativa de troca (horas trabalhadas e DF) foram fornecidos separadamente pela equipe de manutenção.

A metodologia utilizada para os caminhões é idêntica à aplicada aos equipamentos de carga, a Tabela 17 apresenta o intervalo de horas trabalhadas e os respectivos valores de DF para a estimativa do período de substituição dos equipamentos de transporte.

Tabela 17 - Disponibilidade física para caminhões.

Intervalo de Horas Trabalhadas		DF
0	5.000	88,0%
5.001	10.000	87,0%
10.001	15.000	86,5%
15.001	20.000	84,8%
20.001	25.000	82,5%
25.001	30.000	82,2%
30.001	35.000	80,6%
35.001	40.000	78,9%
40.001	45.000	77,3%

45.001	50.000	75,7%
50.001	55.000	74,0%
55.001	60.000	72,4%
60.001	65.000	71,7%
65.001	70.000	64,0%

Fonte: Autor (2023).

Para os caminhões também foram disponibilizados as horas trabalhadas totais de cada equipamento, sendo apresentadas nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18 - Horas trabalhadas totais dos caminhões da frota 793D

Equipamento	Frota	Horas Trabalhadas Totais
CM-7901	793D	847
CM-7902	793D	6.999
CM-7904	793D	5.738
CM-7905	793D	1.433
CM-7906	793D	6.870
CM-7907	793D	47.252
CM-7908	793D	6.115
CM-7910	793D	6.889
CM-7911	793D	48.153
CM-7912	793D	47.312
CM-7913	793D	42.995
CM-7914	793D	36.033
CM-7915	793D	1.441
CM-7916	793D	38.224
CM-7917	793D	38.783
CM-7918	793D	5.284
CM-7919	793D	36.269

Fonte: Autor (2023).

Tabela 19 - Horas trabalhadas totais dos caminhões da frota 793F.

Equipamento	Frota	Horas Trabalhadas Totais
CM-7920	793F I	33.733
CM-7921	793F I	33.803
CM-7922	793F I	36.007
CM-7923	793F I	37.676
CM-7924	793F I	37.523

CM-7925	793F I	30.714
CM-7926	793F I	32.512
CM-7927	793F I	37.434
CM-7928	793F II	31.250
CM-7929	793F II	29.794
CM-7930	793F II	31.032
CM-7931	793F II	31.770
CM-7932	793F II	26.236
CM-7933	793F II	31.316
CM-7934	793F II	30.774
CM-7935	793F II	25.390
CM-7936	793F II	31.141
CM-7937	793F II	31.103
CM-7938	793F II	27.860
CM-7939	793F II	29.088
CM-7940	793F II	31.143
CM-7941	793F II	31.515
CM-7942	793F II	30.816
CM-7943	793F II	29.100
CM-7944	793F II	31.726
CM-7945	793F II	30.381
CM-7946	793F II	29.619
CM-7947	793F II	30.310
CM-7948	793F II	31.422
CM-7949	793F II	28.724
CM-7950	793F II	28.955
CM-7951	793F II	30.278
CM-7952	793F II	22.950
CM-7953	793F II	30.541
CM-7954	793F II	26.931
CM-7955	793F II	32.645
CM-7956	793F II	29.738
CM-7957	793F II	30.292

Fonte: Autor (2023).

A UT fornecida foi de 63% para aplicação em toda a frota de transporte, sendo este utilizado para estimar a substituição de todos os caminhões. Com a determinação da substituição dos equipamentos, foi realizado em seguida a determinação da capacidade das frotas de acordo com a necessidade de movimentação estabelecida pelo plano, aliada a substituição dos equipamentos definidos pelo plano de aquisição/substituição realizado neste capítulo.

3.3 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DAS FROTAS

Neste capítulo serão abordados os procedimentos e cálculos realizados para determinar a capacidade de movimentação das frotas de carregamento e transporte, bem como, a relação entre a capacidade estimada e a capacidade necessária estipulada pelo plano de exaustão.

A movimentação total programada pelo plano de exaustão pode ser visualizada através da Tabela 20.

Tabela 20 - Movimentação total programada pelo plano de exaustão.

Período	Outras Movimentações	Produção de Mina	Movimentação Total
2028	25.303.958	144.679.578	169.983.536
2029	27.336.000	165.000.000	192.336.000
2030	25.400.000	200.000.000	225.400.000
2031	30.000.000	300.000.000	330.000.000
2032	31.500.000	315.000.000	346.500.000
2033	31.500.000	315.000.000	346.500.000
2034	31.500.000	315.000.000	346.500.000
2035	31.500.000	315.000.000	346.500.000
2036	31.573.185	315.731.852	347.305.037
2037	30.698.259	306.982.587	337.680.846
2038	31.500.000	315.000.000	346.500.000
2039	38.500.000	385.000.000	423.500.000
2040	38.500.000	385.000.000	423.500.000
2041	38.420.457	384.204.572	422.625.029
2042	16.419.524	164.195.244	180.614.768

Fonte: Autor (2023).

As movimentações realizadas em serviços auxiliares e na retomada de estoque compõem a coluna de outras movimentações.

3.3.1 Frotas Atuais

Inicialmente foi calculado a capacidade de movimentação das frotas atuais ano após ano em relação aos equipamentos disponíveis fornecidos pelo plano de substituição.

Determinou-se a capacidade das frotas a partir da Equação 16.

$$Cap = HDA \times DF_M \times UT \times PH \times ND \quad (16)$$

Onde:

Cap: é a capacidade de movimentação da frota.

HDA: se refere as horas totais disponíveis para o ano.

DF_M: é a disponibilidade física média da frota para o ano.

UT: é o fator de utilização fixo.

ND: Número de equipamentos disponíveis.

A DF_M é obtida através da média entre as disponibilidades físicas dos equipamentos disponíveis no ano, conforme a projeção dos valores do plano de substituição.

A Tabela 21 apresenta a DF utilizada no dimensionamento da capacidade das frotas atuais de carga e de transporte até o fim da vida útil dos equipamentos.

Tabela 21 - Disponibilidade física dos equipamentos utilizada no dimensionamento da capacidade das frotas atuais.

Período	CAT 6060	CAT 793D	CAT 793F
2028	74%	72%	74%
2029	74%	72%	73%
2030	73%	67%	71%
2031	73%	68%	70%
2032	72%	76%	65%
2033	72%	74%	-
2034	71%	74%	-
2035	71%	72%	-
2036	-	72%	-
2037	-	74%	-
2038	-	-	-
2039	-	-	-
2040	-	-	-
2041	-	-	-
2042	-	-	-

Fonte: Autor (2023).

A UT aplicada foi de 55% para as escavadeiras e 65% para os caminhões, valores esses indicados pela equipe de planejamento de mina da empresa.

3.3.2 Frotas Novas

Com a determinação da capacidade das frotas atuais, o próximo passo foi a realização do dimensionamento da capacidade das frotas novas, ou seja, daqueles equipamentos que seriam necessários adquirir para complemento da capacidade atual de movimentação e posterior atendimento à necessidade do plano.

Para o cálculo da capacidade das frotas novas também foi utilizada a Equação 16, sendo modificado somente o número de equipamentos e a disponibilidade física utilizada.

A DF utilizada para o dimensionamento da capacidade das frotas novas para o plano de exaustão, foi obtida através do cálculo da média ponderada entre os respectivos valores de DF para os equipamentos, pelo total da soma do número de equipamentos para o respectivo ano.

Os valores utilizados para UT foram de 55% para as escavadeiras e 65% para os caminhões conforme utilizado para as frotas atuais, enquanto para as carregadeiras foi utilizado um fator de 60%.

A Tabela 22 apresenta os valores de DF utilizados para o dimensionamento das frotas de carregamento e de transporte.

Tabela 22 - Disponibilidade física utilizada para o dimensionamento das novas frotas de carga e de transporte.

Período	Escavadeiras Hidráulicas Novas	Carregadeiras Novas	Caminhões Novos
2028	78%	84%	86%
2029	77%	83%	86%
2030	78%	82%	85%
2031	80%	81%	87%
2032	79%	79%	86%
2033	77%	78%	84%
2034	75%	77%	83%
2035	75%	75%	81%
2036	76%	75%	82%
2037	75%	74%	81%
2038	74%	73%	80%
2039	76%	74%	80%
2040	75%	73%	78%
2041	74%	73%	76%
2042	73%	79%	76%

Fonte: Autor (2023).

Neste caso, foi fornecido também uma projeção para a DF que ultrapassasse a vida útil anteriormente estipulada, ou seja, em caso de necessidade de extensão de uso de um equipamento, seria realizada uma revitalização completa estendendo assim sua operação por até 3 anos.

Os métodos apresentados foram utilizados para as frotas de carregamento e de transporte em sua totalidade, sendo distinto somente os valores de DF fornecidos conforme o plano de aquisição.

Com a possibilidade de extensão da vida útil devido o processo de revitalização, foi fornecido a seguinte tabela, Tabela 23, no qual é apresentada a DF projetada para este período de extensão.

Tabela 23 - Disponibilidade física projetada para o período de extensão da vida útil dos equipamentos.

Disponibilidade Física			
Período	Escavadeiras	Carregadeiras	Caminhões
1º Ano de Extensão	66%	66%	60%
2º Ano de Extensão	64%	64%	60%
3º Ano de Extensão	62%	62%	60%

Fonte: Autor (2023).

A determinação do número ideal de equipamentos se deu através da avaliação de cenários entre a capacidade total de movimentação das frotas e da capacidade de movimentação necessária estipulada para o plano, a capacidade total das frotas foi composta pelo somatório entre a capacidade das frotas atuais e da capacidade das frotas novas.

Utilizou-se uma configuração de planilhas no software Microsoft Excel para a criação de um sistema que simulasse a variação da capacidade das frotas por meio da variação do número de equipamentos a serem adquiridos, ou seja, através da Equação 16 buscou-se variar o número de equipamentos até o atendimento da capacidade em relação ao plano.

Utilizou-se deste método para cada tipo de equipamento, sendo estes separados ao fim por suas funções em duas planilhas, uma referente ao carregamento e outra ao transporte, no qual foram somadas as respectivas capacidades das frotas e definida sua relação com a capacidade de movimentação necessária. Os Anexos P e Q apresentam as planilhas e sua configuração.

Para os equipamentos de carga, procurou-se a aquisição do menor número de carregadeiras possível, tendo em vista que este equipamento possui um maior custo associado devido ao tipo de combustível utilizado.

Por outro lado, realizou-se o dimensionamento da frota de carregadeiras buscando-se uma capacidade mínima que fosse suficiente para atendimento das movimentações que envolviam os serviços auxiliares e a retomada de estoque, dado sua maior utilização para estas atividades.

4 RESULTADOS

A seguir serão descritos os resultados obtidos para o dimensionamento das frotas de carregamento, no qual estão inseridas as composições das frotas de escavadeiras e de carregadeiras, bem como, os modelos de aquisição propostos para atendimento da capacidade de movimentação total da frota de carregamento.

Em relação a frota dos equipamentos de transporte, também serão apresentados os resultados e análises referentes ao modelo de aquisição proposto para o atendimento do plano de exaustão, bem como, à composição da frota ao longo dos anos e os respectivos valores de capacidade obtidos.

4.1 EQUIPAMENTOS DE CARREGAMENTO

Com a produção proposta pelo plano de exaustão, verificou-se a necessidade de aumento da frota de carga ao longo dos anos a fim de atender a capacidade de movimentação necessária.

Na Tabela 24 é descrito o modelo de composição da frota de carregamento, conforme foram dimensionadas as quantidades de saídas e entradas de equipamentos para obtenção da capacidade de movimentação necessária.

Tabela 24 - Composição da frota de carregamento.

Anos	Frota Atual		Saída de Equip.	Aquisição de Equip.	Frota Nova de Escavadeiras	Frota Nova de Carregadeiras	Frota Total
	CAT 6060	994H					
2028	4	0	6	6	7	6	17
2029	4	0	0	3	8	8	20
2030	4	0	0	3	10	9	23
2031	4	0	0	14	20	13	37
2032	4	0	0	0	20	13	37

2033	4	0	0	0	20	13	37
2034	4	0	0	0	20	13	37
2035	4	0	0	0	20	13	37
2036	0	0	4	4	24	13	37
2037	0	0	0	0	24	13	37
2038	0	0	0	0	24	13	37
2039	0	0	0	7	30	14	44
2040	0	0	0	0	30	14	44
2041	0	0	0	0	30	14	44
2042	0	0	14	0	29	1	30

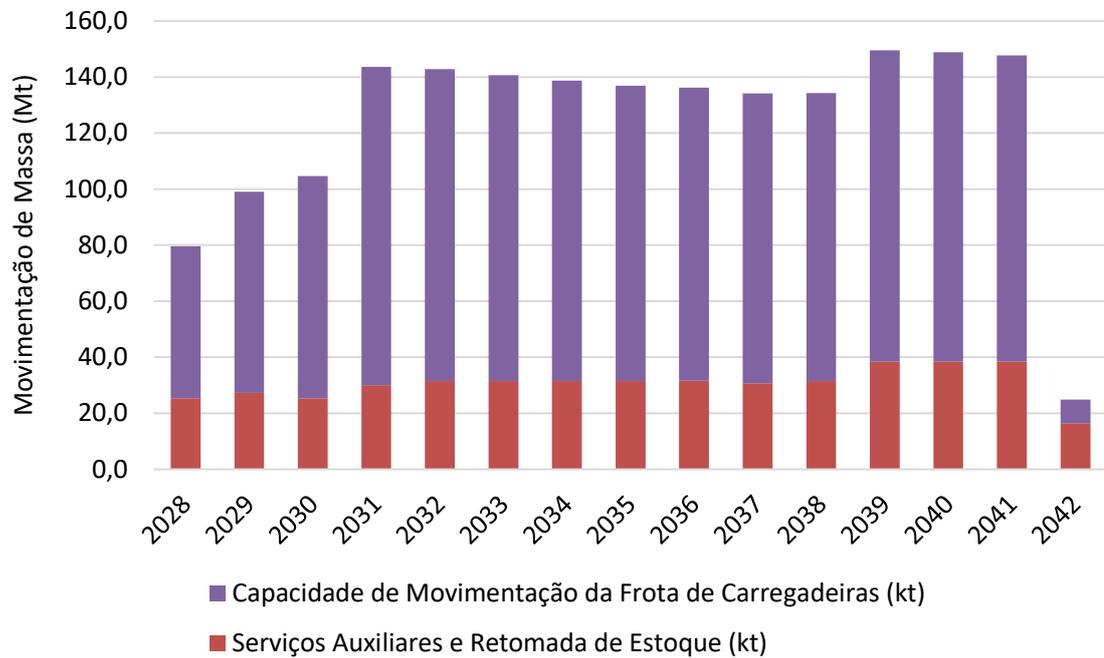
Fonte: Autor (2023).

Ao longo dos anos, observou-se a necessidade de aquisição de novos equipamentos para o atingimento e manutenção da capacidade necessária para a frota.

Para o dimensionamento em relação ao número de escavadeiras hidráulicas e de carregadeiras, optou-se impreterivelmente por um aumento do número de escavadeiras, tendo em vista, os maiores índices de produtividade, bem como, os maiores custos associados e a necessidade de maior área de operação para as carregadeiras. Dessa forma, o dimensionamento da frota de carregadeiras se concentrou basicamente no atendimento as necessidades de movimentação para retomada de estoques e realização de serviços auxiliares.

A Figura 15 apresenta a configuração obtida entre a capacidade da frota de carregadeiras e as movimentações de serviços auxiliares e retomada de estoque.

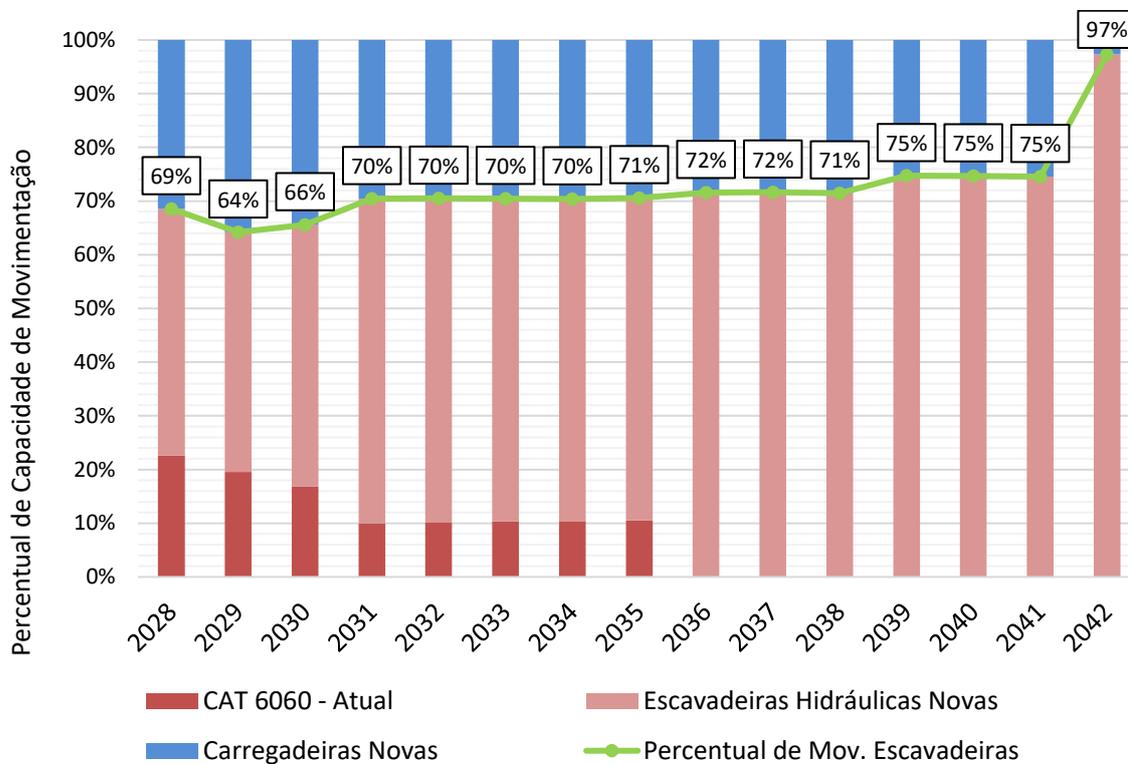
Figura 15 – Relação entre a capacidade da frota de carregadeiras e as movimentações de serviços auxiliares e retomada de estoque.



Fonte: Autor (2023).

Com isso, tem-se na Figura 16 a respectiva distribuição obtida para a frota de escavadeiras e para a frota de carregadeiras em relação a capacidade de movimentação total para a frota de carregamento.

Figura 16 – Percentual de capacidade de movimentação das frotas em relação à capacidade total de carregamento.



Fonte: Autor (2023).

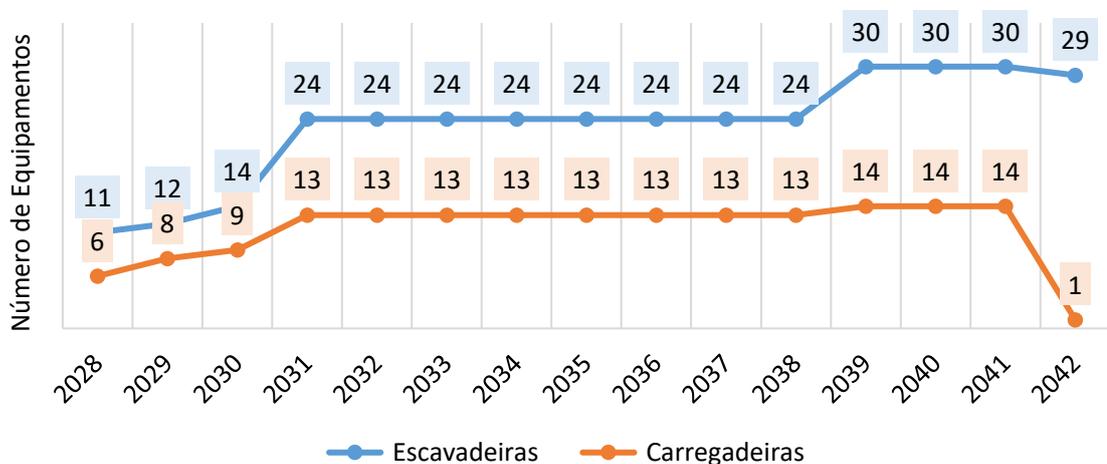
Para o início do plano de exaustão em 2028, observa-se uma queda no percentual de participação das escavadeiras em relação a capacidade total de frota, quando comparado ao fim do plano quinquenal em 2027, isso se dá devido à troca total da frota de carregadeiras para o ano e menor produtividade das escavadeiras atuais. Por outro lado, com o decorrer do plano de exaustão a frota de escavadeiras passa a ter maior representatividade na capacidade de movimentação total da frota de carregamento, destacando-se o período de 2031 a 2038, quando não ocorrem grandes modificações na composição e a mesma passa a ter maior estabilidade.

Neste período a frota de escavadeiras tem um percentual médio de participação na capacidade total da frota de carregamento de cerca 71%, enquanto a frota de carregadeiras possui cerca de 29%.

Para o período final do plano de exaustão de 2039 a 2042, tem-se um aumento inicial do percentual de participação da frota de escavadeiras em cerca de 4%, isso se dá ao grande aumento de movimentação previsto e da aquisição de um grande número de escavadeiras, conforme será visto no capítulo seguinte. Além disso, observa-se um valor máximo de participação da frota de escavadeiras de cerca de 97% em 2042, o último ano para o plano e fim da vida útil prevista para a mina, no qual se dá devido ao fim vida útil estipulada para a frota de carregadeiras que foram adquiridas no início do plano.

Na Figura 17 é possível observar a composição da frota ao longo dos anos, com destaque para o ano de 2031, quando o número de escavadeiras passa a ser substancialmente maior em relação às carregadeiras, tendo em vista, a necessidade de aumento de movimentação previsto de acordo com a movimentação definida pelo plano para o ano.

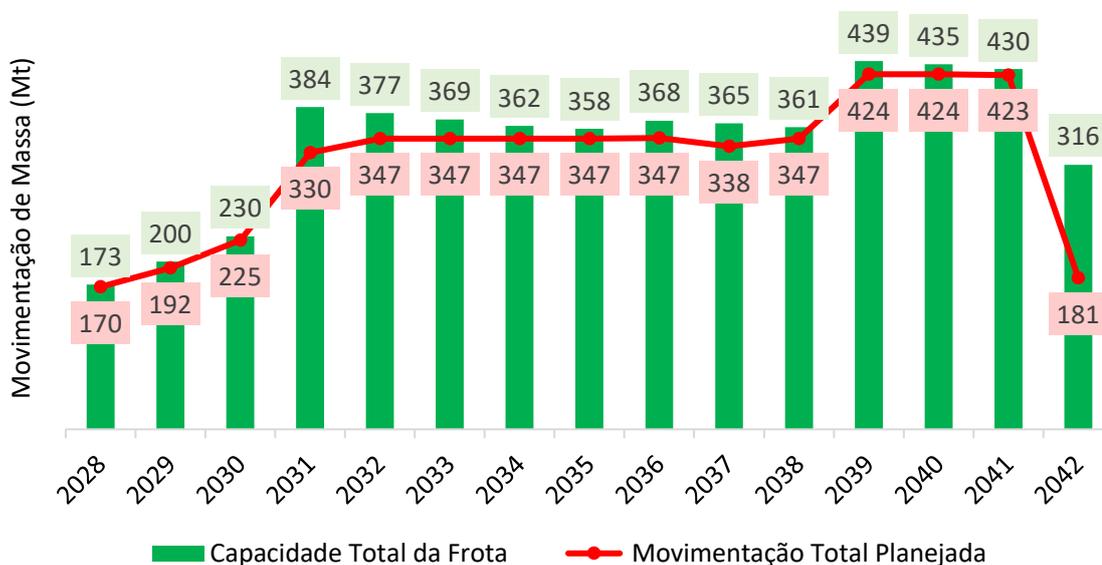
Figura 17 – Composição das frotas de escavadeiras e de carregadeiras ao longo do plano.



Fonte: Autor (2023).

A relação entre a capacidade obtida e a necessidade estabelecida pela movimentação total planejada, podem ser observadas na Figura 18.

Figura 18 - Capacidade da frota de carregamento e a movimentação total planejada.



Fonte: Autor (2023).

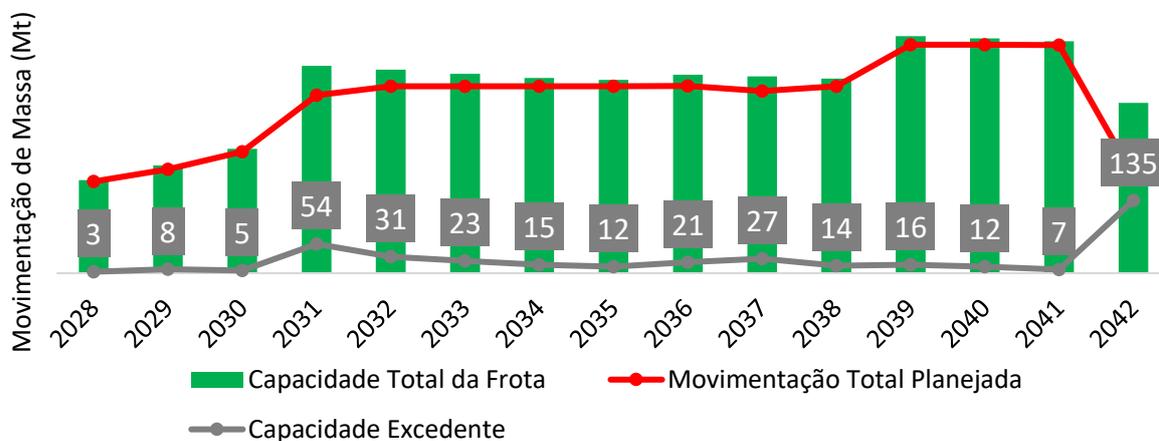
Para o início do plano de exaustão, de 2028 a 2030, a capacidade obtida para a frota ficou mais próxima ao planejado se comparada aos demais períodos, tendo em vista que dessa forma a frota estaria muito mais próxima de seu limite de operação, ou seja, não havendo capacidade para grandes manobras no plano de lavra.

Em contrapartida, a aquisição de mais equipamentos neste período elevaria a capacidade da frota muito além da necessidade para os anos seguintes, o que não seria viável, tendo em vista o foco no aumento da frota em 2031 devido ao grande aumento de movimentação.

A partir de 2031, com o aumento significativo da produção, a frota consegue fornecer capacidade suficiente para atender o plano ao longo dos próximos 7 anos sem a aquisição de novos equipamentos para o período.

A Figura 19 descreve a capacidade excedente de movimentação obtida ao longo do plano, no qual destaca-se que durante o plano de exaustão a frota não ficará sobrecarregada e ainda possuirá capacidade para operar pequenas mudanças que possam ocorrer no plano de lavra.

Figura 19 – Capacidade excedente de movimentação da frota de carregamento.



Fonte: Autor (2023).

4.1.1 Escavadeiras

Na Tabela 25 observa-se o número de escavadeiras necessárias para o atendimento de plano de exaustão, bem como, a manutenção da capacidade da frota, tendo em vista a substituição dos equipamentos que atingiriam o fim de vida útil ao longo do plano.

Tabela 25 - Composição da frota de escavadeiras ao longo do plano.

Período	Frota Atual	Saída de Equipamentos	Aquisição de Equipamentos	Número de Equipamentos da Frota Nova	Frota Total
	CAT 6060				
2028	4	0	0	7	11
2029	4	0	1	8	12
2030	4	0	2	10	14
2031	4	0	10	20	24
2032	4	0	0	20	24
2033	4	0	0	20	24

2034	4	0	0	20	24
2035	4	0	0	20	24
2036	0	4	4	24	24
2037	0	0	0	24	24
2038	0	0	0	24	24
2039	0	0	6	30	30
2040	0	0	0	30	30
2041	0	0	0	30	30
2042	0	1	0	29	29

Fonte: Autor (2023).

Para o plano de exaustão, tem-se mudança na frota a partir de 2029. O dimensionamento se concentra no aumento gradativo da capacidade da frota de escavadeiras, a fim de suprir o aumento da produção planejada, indicando a necessidade de aquisição de um equipamento em 2029 e dois em 2030, possuindo um total de 14 escavadeiras em 2030.

Considerando o aumento substancial de produção para os anos seguintes, identificou-se a necessidade de aquisição de maior quantidade de equipamentos, sendo necessária a aquisição de 10 escavadeiras em 2031. Dessa forma, a capacidade necessária da frota é atendida até 2038, devido a uma produção com menor variação durante nesse período. Em 2036, tem-se novamente a necessidade de aquisição de novos equipamentos para a manutenção da capacidade da frota em função da saída de quatro equipamentos CAT6060 em 2035.

Com isso, a capacidade da frota é atendida até 2039 quando há novamente necessidade de aquisição de seis novos equipamentos devido ao aumento de produção planejado para o triênio, sendo está a última aquisição de equipamentos necessária até a exaustão da mina e cumprimento do plano. Aliado a isso, ocorre no último ano de operações a saída de um equipamento no qual o mesmo atinge o fim de sua vida útil, sendo tal saída não prejudicial para a capacidade da frota.

4.1.2 Carregadeiras

Com relação ao dimensionamento da frota de carregadeiras, tinha-se o objetivo do atendimento da capacidade da frota de carregamento em conjunto com a frota de escavadeiras visando o atendimento do plano. Além disso, tinha-se também o atingimento do percentual mínimo para as operações de retomada de estoque e de serviços auxiliares. Deste modo, a composição da frota de carregadeiras que obedece a estes dois preceitos foi a seguinte, conforme a Tabela 26.

Tabela 26 - Composição da frota de carregadeiras ao longo do plano.

Período	Frota Atual	Saída de Equipamentos	Aquisição de Equipamentos	Número de Equipamentos da Frota Nova	Frota Total
	994H				
2028	0	6	6	6	6
2029	0	0	2	8	8
2030	0	0	1	9	9
2031	0	0	4	13	13
2032	0	0	0	13	13
2033	0	0	0	13	13
2034	0	0	0	13	13
2035	0	0	0	13	13
2036	0	0	0	13	13
2037	0	0	0	13	13
2038	0	0	0	13	13
2039	0	0	1	14	14
2040	0	0	0	14	14
2041	0	0	0	14	14
2042	0	13	0	1	1

Fonte: Autor (2023).

Em relação a frota 994H de carregadeiras, a mesma atinge o fim de sua vida útil no ano anterior ao início do plano de exaustão, sendo necessário a aquisição de equipamentos para a manutenção da capacidade já em 2028.

Aliado a isso, em 2030 tem-se a necessidade de aquisição de um equipamento e em 2031 de quatro equipamentos para atendimento da capacidade. O motivo dessas

aquisições não serem realizadas em conjunto com a renovação da frota em 2028 é que com o fim do tempo de vida útil desses equipamentos, seria necessário a aquisição de outros para suprir a necessidade da frota, o que seria inviável, visto que, nesse cenário a operação esteja em seus estágios finais.

Com o objetivo de se adquirir o menor número possível de carregadeiras ao longo dos anos, dado a sua operacionalidade, se faz necessária a extensão da vida útil dos equipamentos obtidos em 2028, 2029 e 2030.

Com isso, esses equipamentos teriam sua vida útil expandida até 2041, sendo uma extensão de 3, de 2 e de 1 ano respectivamente, além da estimativa de fim da vida útil dos equipamentos, atendendo a capacidade necessária e posteriormente representando a saída de 13 dos 14 equipamentos da frota no respectivo ano, o que poderia prejudicar a capacidade de operação da frota para o último ano, tendo em vista, que mesmo que as operações se encerrem no ano seguinte o fato de contar somente com um equipamento inviabilizaria esta composição final da frota.

Para que não ocorram problemas nas operações o ideal seria manter a mesma composição para frota até o fim das operações mesmo que isso representasse uma capacidade excedente muito superior no último ano, pois no caso de permanecer com somente uma carregadeira no último ano, nos momentos de parada do equipamento para manutenção as operações relacionadas a frota teriam de ser interrompidas.

Ao analisar o cenário obtido, tem-se como satisfatório o resultado alcançado para a composição das frotas, tendo em vista o alcance desejado para a capacidade total de movimentação da frota de carregamento, bem como, dos percentuais de participação representados pelas frotas de escavadeiras e de carregadeiras. Por outro, a quantidade de equipamentos obtidos para o último ano não seria a ideal, tendo em vista que somente um equipamento não poderia suprir as necessidades de movimentação estabelecidas, em virtude das paradas para manutenção do mesmo e não haver equipamentos para substituição.

4.2 EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE

Para a frota de equipamentos de transporte obteve-se a seguinte configuração com as eventuais aquisições e saídas da frota, bem como, as aquisições necessárias para o aumento da capacidade de movimentação.

A Tabela 27 descreve os cenários de aquisições e saídas de equipamentos durante os anos do plano.

Tabela 27 - Composição da frota de transporte ao longo do plano.

Período	Frota Atual		Saída de Equipamentos	Aquisição de Equipamentos	Número de Equipamentos da Frota Nova	Frota Total
	CAT 793D	CAT 793F				
2028	17	38	0	10	32	87
2029	17	38	0	22	54	109
2030	17	38	0	9	63	118
2031	9	32	14	53	116	157
2032	9	5	27	27	143	157
2033	9	0	5	5	148	157
2034	9	0	0	0	148	157
2035	9	0	0	0	148	157
2036	9	0	0	40	188	197
2037	9	0	0	13	201	210
2038	0	0	9	9	210	210
2039	0	0	0	15	216	216
2040	0	0	0	0	216	216
2041	0	0	0	0	216	216
2042	0	0	13	0	203	203

Fonte: Autor (2023).

Para o atendimento ao plano de exaustão, se faz necessária a aquisição de equipamentos em 2028, 2029 e 2030 para o aumento da capacidade de movimentação, sendo adquiridos 10 em 2028, 22 em 2029 e 9 em 2030.

Em 2031 nota-se um ano com muitas modificações na composição da frota, no qual tem-se a saída de 14 equipamentos, sendo 8 da frota CAT 793D e 6 da frota CAT

793F. Além disso, devido a uma ampliação das operações em 2030, há um aumento significativo previsto para a movimentação de ROM, dessa forma faz se necessária aquisição de 53 novos equipamentos para a frota.

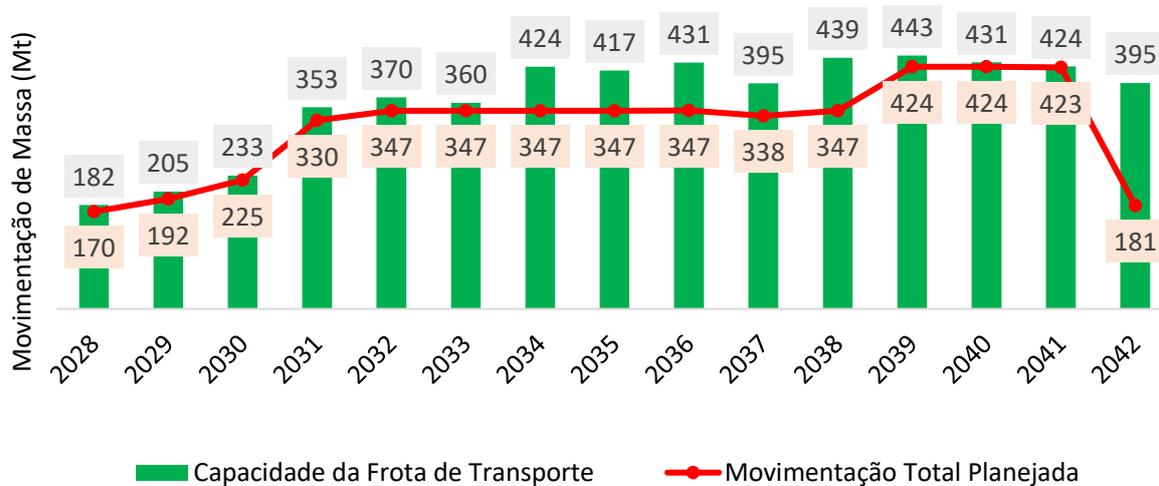
Ocorrem nos dois anos seguintes a saída completa da frota CAT 793F, com 27 equipamentos em 2032 e 5 em 2033, sendo necessário somente a reposição desse número de equipamentos nos respectivos anos, mantendo a capacidade da frota e permanecendo com um total de 157 equipamentos no período entre 2031 e 2035.

Em 2036, 2037 e 2038 a produção se mantém semelhante aos anos anteriores, mas há a necessidade de aumento da capacidade da frota devido à baixa produtividade provocada pelo aumento significativo da DMT.

Com o declínio da capacidade da frota CAT 793D e sua iminente saída em 2037, constatou-se a necessidade de aquisição de 40 equipamentos em 2036, 13 em 2037 e 9 em 2038. Para 2039 identificou-se novamente a necessidade de aumento da capacidade sendo necessário a aquisição de 15 novos equipamentos, por fim tem-se a saída de 13 equipamentos da frota em 2042 totalizando 203 equipamentos ao fim do plano.

A Figura 20 descreve a relação entre a capacidade de movimentação obtida com a proposta de aquisição dos novos equipamentos e a capacidade necessária estipulada pelo plano.

Figura 20 – Capacidade de movimentação da frota de transporte e a movimentação total planejada.

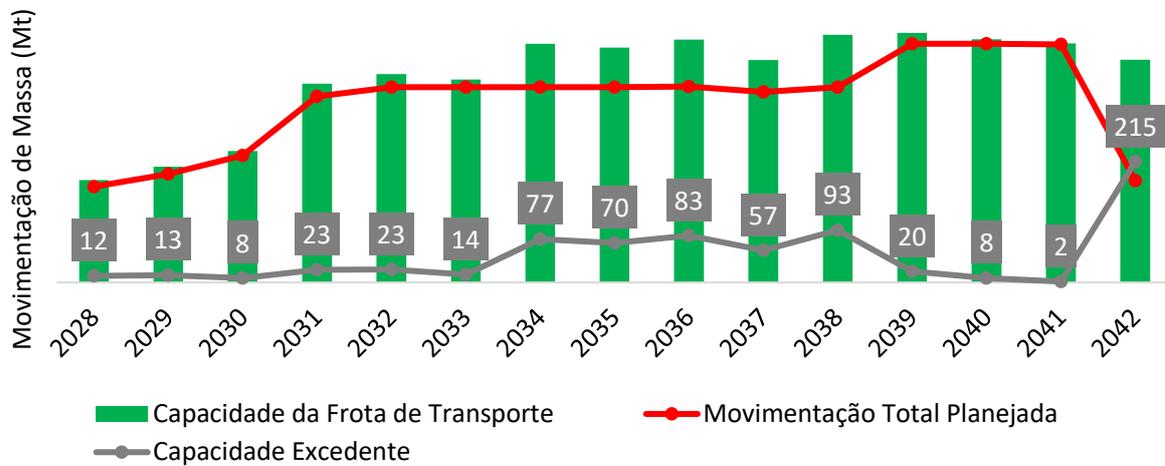


Fonte: Autor (2023).

Destaca-se inicialmente que no período de 2028 a 2033 foi obtido uma capacidade de movimentação mais próxima do necessário, ou seja, não obtendo uma capacidade excedente muito grande para a frota.

A Figura 21 apresenta as capacidades excedentes para cada ano do plano de acordo com o dimensionamento da frota dos equipamentos de transporte.

Figura 21 – Capacidade excedente da frota de transporte ao longo do plano.



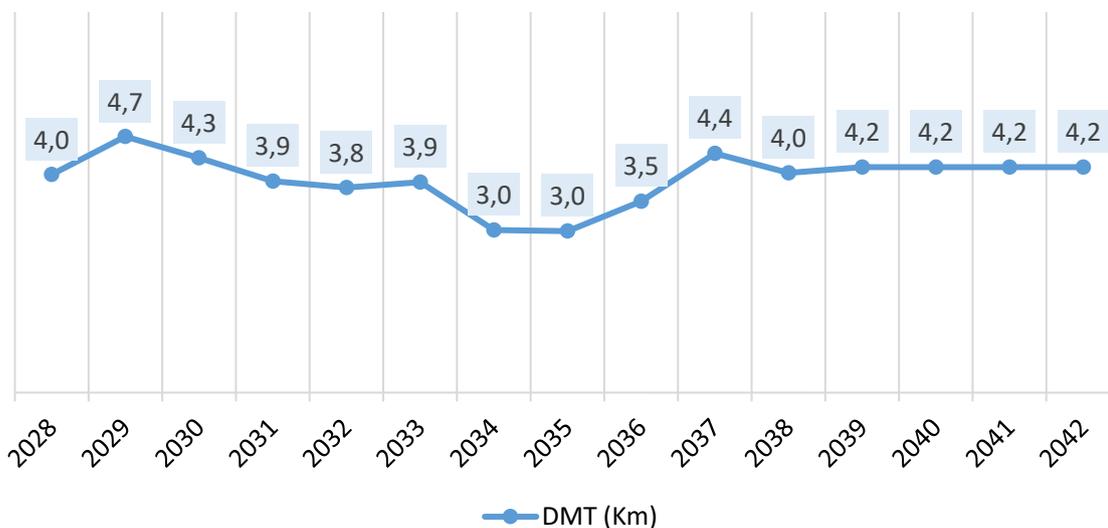
Fonte: Autor (2023).

Em contrapartida, de 2034 a 2038 a frota terá uma capacidade excedente muito maior, podendo impactar diretamente no dimensionamento dos equipamentos para um cenário de lavra de um plano de curto prazo, sendo necessário deixar equipamentos fora da frota prevista para operar aquele período.

Para 2034 e 2035 esse aumento é explicado pela redução da DMT neste período, o que faz com que a produtividade da frota neste período aumente consideravelmente, para uma necessidade de movimentação planejada igual aos 2 anos anteriores.

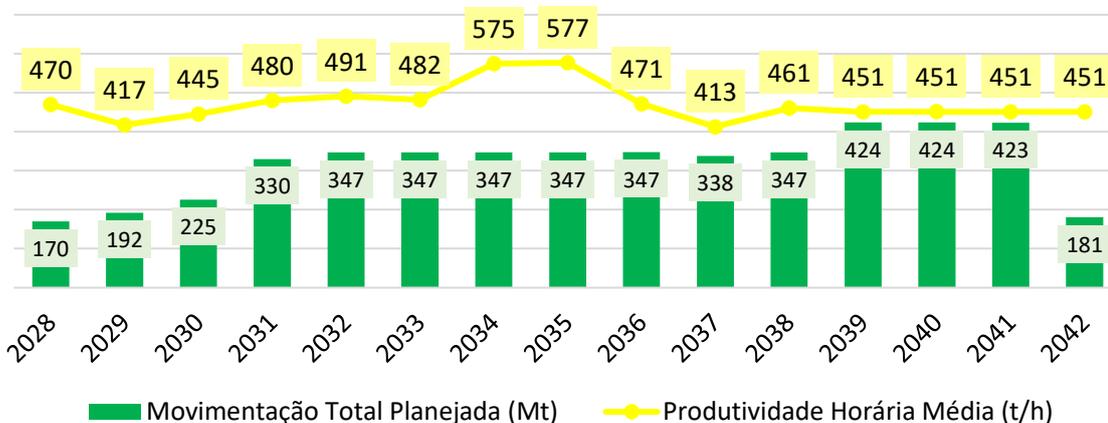
A Figura 22 apresenta a redução da DMT para o período, enquanto a Figura 23 relaciona a produtividade média do ano e a movimentação total planejada.

Figura 22 – DMT média ao longo dos anos do plano.



Fonte: Autor (2023).

Figura 23 – Produtividade média dos equipamentos de transporte



Fonte: Autor (2023).

De 2036 a 2038 os elevados valores para a capacidade excedente da frota foram causados pela grande redução da produtividade em função do aumento da DMT, o que ocasionou em uma necessidade de aumento do número de equipamentos para suprir a necessidade de movimentação do plano.

Outro fator que corroborou para essa elevada capacidade excedente citada anteriormente, foi o grande aumento de movimentação estipulado para 2039, 2040 e 2041, onde optou-se pela aquisição de um número elevado de equipamentos para que suprisse a necessidade de movimentação durante esses anos e conseqüentemente para o último ano do plano. Essa opção se deu em função da inviabilidade de se adquirir equipamentos novos ao longo dos anos mais próximos à exaustão da mina, tendo em vista a sua baixa utilização e como consequência, a necessidade de se desfazer destes equipamentos ao fim das operações.

Desta forma, a capacidade total de movimentação para a frota dos equipamentos de transporte em 2041 ficaria muito próxima à movimentação total planejada.

5 CONCLUSÃO

Com a realização do trabalho abordado, foi possível obter o dimensionamento dos equipamentos de carregamento e transporte para atendimento da movimentação total planejada em um cenário de aumento gradativo da produção. Aliado a isso, o dimensionamento foi realizado cumprindo todos os objetivos definidos anteriormente, como o atendimento à capacidade de movimentação estipulada pelo plano de exaustão e também da capacidade mínima da frota de carregadeiras de acordo com a movimentação de retomada de estoque e serviços auxiliares.

Dessa forma, tem-se a base para uma observação inicial da utilização do estudo para a tomada de decisões estratégicas, no que se refere a confecção de planos de lavra em um horizonte de longo prazo, bem como, das necessidades de modificação da frota para atendimento dos mesmos. Além disso, tem-se a possibilidade de análise dos índices de operação das frotas atuais, como tempo total de ciclo e distância média de transporte, além da produtividade horária dos equipamentos.

Para os equipamentos de carregamento atingiu-se a capacidade da frota necessária para o plano em virtude do modelo de substituição e aquisição proposto. Aliado a isso, também se atingiu a composição mínima para a frota de carregadeiras, em função da necessidade de movimentação de retomada de estoque e serviços auxiliares.

Verificou-se que a contribuição da frota de carregadeiras para a capacidade de movimentação total foi bem acima da necessária para as retomadas de estoque e operação de serviços auxiliares, o que possibilita também a utilização das carregadeiras em possíveis operações de lavra. Aliado a isso, para o último ano do plano seria necessário a aquisição de mais equipamentos mantendo assim a mesma configuração de frota dos anos anteriores, pois a utilização de somente uma carregadeira poderá implicar em problemas na operação devido os momentos de parada para manutenção.

Destaca-se que para o plano de exaustão proposto seria necessário um número elevado de equipamentos de carregamento, o que dificultaria a operação neste cenário de movimentação, pois acessos e rampas, além de praças de carregamento não teriam dimensões suficientes para o trânsito e manobra de um elevado número de equipamentos, além disso, a capacidade das oficinas de manutenção, bem como, o número de colaboradores necessários para esses serviços teria de ser redimensionado. Outro ponto seria a dificuldade em alocar todos esses equipamentos de modo com que as operações ocorram e não se tenha equipamentos ociosos ou criação de filas.

Em relação aos equipamentos de transporte, a capacidade obtida para a frota também supre as necessidades de movimentação estabelecidas pelo plano. Por outro lado, assim como a frota de carregamento, observa-se a necessidade de aquisição de muitos equipamentos para atendimento da movimentação, o que do ponto de vista operacional poderá representar a necessidade de adaptação do plano e dos cenários de movimentação propostos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fatores operacionais como as dimensões para a área de carregamento, largura de vias e acessos, capacidade das oficinas de manutenção, aumento de pessoal e estrutura para as áreas de manutenção devem ser estudados futuramente a fim de se avaliar a possibilidade aquisição de equipamentos de transporte com maior capacidade de carga.

Podem ser desenvolvidos estudos futuros sobre a compatibilidade entre as frotas atuais de equipamentos de carregamento e de transporte, a fim de se obter o melhor “fleet match” possível. Outra alternativa que pode se tornar viável, seria a implantação de uma frota de transporte mista, seja ela adaptada de acordo com as destinações de material, pilhas de estéril ou planta de beneficiamento, ou para frentes de lavra

específicas, no qual seja possível o trânsito de equipamento de maior carga média que a atual.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, W. E. **Uma Análise da Importância do Plano de Aproveitamento Econômico no Processo de Tomada de Decisão na Mineração.** Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017.

AMARAL, M. **Modelos Matemáticos e Heurísticas para Auxílio ao Planejamento de Operações de Lavra em Minas a Céu Aberto.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

BORGES, T. C. **Análises dos Custos Operacionais de Produção no Dimensionamento de Frotas de Carregamento e Transporte em Mineração.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

CAMPOS, P. H. A. **Um Comparativo de Metodologias no Planejamento de Lavra: Sequenciamento Direto de Blocos Vs. Planejamento Tradicional.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017.

CARMO, F. A. R. **Metodologias para o Planejamento de Cavas Finais de Minas a Céu Aberto Otimizadas.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2001.

CASTRO, M. R. **Estudo de Substituição de Equipamentos Utilizando a Técnica do LCC e a Metodologia CAUE para Definir a Vida Útil Econômica: O Caso de uma Empresa do Setor de Mineração.** Monografia (Graduação), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

COSTA, F. P. **Aplicações de Técnicas de Otimização a Problemas de Planejamento Operacional de Lavra em Minas a Céu Aberto.** Ouro Preto: Escola

de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Programa de PósGraduação em Engenharia Mineral. 2005.

COSTA, R. H. P. **Análise da Aplicação de um Software Dispatch no Sistema de Transporte de uma Mineradora.** Monografia (Especialização), Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Nucletrans – Núcleo de Transportes Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

COUTINHO, H. L. **Melhoria Contínua Aplicada para Carregamento e Transporte na Operação de Mina a Céu Aberto.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017.

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

CURI, A. **Minas a Céu Aberto Planejamento de Lavra.** Oficina Textos. São Paulo, 2014.

FERREIRA, D. L. **Dimensionamento de Frota Utilizando Indicadores Operacionais.** Monografia (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá, 2021.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering.** John Wiley & Sons, 2002.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. **Open Pit Mine Planning & Design.** 3ª. ed: Taylor & Francis Group, LLC, v. Volume 1 - Fundamentals, 2013.

JAWORSKI. T. **Manual de Equipamentos para Escavação – Compactação e Transporte.** Revisão e digitalização por Prof. Camilo Borges Neto, Ms.C.Eng. Civil; Out/2011. p. 18-30.

JÚNIOR, W. T. S. **Seleção de Caminhões Rodoviários para Mineração Utilizando a Metodologia de Auxílio Multicritério à Decisão.** Estudo de Caso: Mineração de Bauxita. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

KOPPE, J. Capítulo 1 - **A lavra e a Indústria Mineral no Brasil-Estado da Arte e Tendências Tecnológicas**, In: Fernandes, F.; Castilhos, Z.; Luz, A. B.; Matos, G.(eds.), Tendências - Brasil 2015 - Geociências e Tecnologia Mineral, Parte II - Tecnologia Mineral, CETEM-Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro 2007.

LOPES, J. R. **Viabilização Técnica e Econômica da Lavra Contínua de Minério de Ferro com Uso de Sistema de Britagem Móvel “In Pit” Auto Propelido**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

MANDARINO, M. F. **Análise de Métodos para Planejamento de Curto Prazo: uma Abordagem para o Line Up**. Monografia (Graduação), Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.

MOREIRA, F. N. **Dimensionamento de Frota de Transporte e Carregamento para as Operações Unitárias de uma Mina em Expansão**. Monografia (Graduação). Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.

OLIVEIRA, D. P. **Rebouças de Planejamento Estratégico: Conceitos, Metodologia e Práticas**. 35ª ed. Atlas Ltda, 2023.

PERONI, R. **Manual de Operação de Lavra de Dimensionamento de Equipamentos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

PINTO, C.; DUTRA, J. G. **Introdução ao Planejamento e Operação de Lavra (A Céu Aberto e Subterrânea)**. Universidade Corporativa Chemtech. Belo Horizonte, 2008.

QUEVEDO, J. M. G.; DIALLO, M.; LUSTOSA, L. J. **Modelo de Simulação para o Sistema de Carregamento e Transporte em Mina a Céu Aberto**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

RACIA, I. N. **Desenvolvimento de um Modelo de Dimensionamento de Equipamento de Escavação e de Transporte em Mineração**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação - Terraplenagem e Escavação de Rocha**. 3ª Edição. São Paulo: PINI, 2007.

RODRIGUES, L. F. **Análise Comparativa de Metodologias Utilizadas no Despacho de Caminhões em Minas a Céu Aberto**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SANTOS, E. A. R. **Dimensionamento de Frota Semanal com Detalhamento Diário e a Influência na Aderência e Cumprimento do Plano de Lavra**. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SILVA, V. C. **Carregamento e Transporte de Rochas**. Apostila. DEMIN/UFOP. 2011.

SILVA, V. C. **Carregamento e transporte de rochas**. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2009.

TEIXEIRA, L. A. C. **Caracterização de Payloads via Telemetria**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

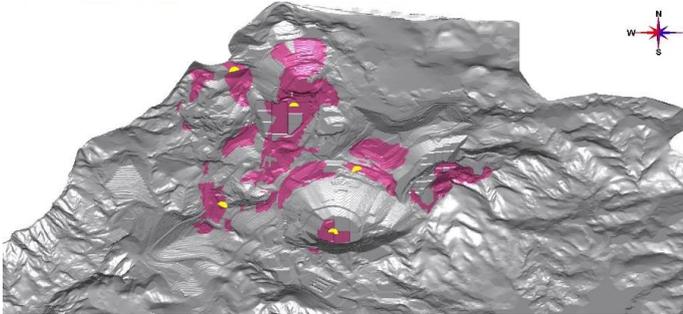
THORLEY, U. **Open Pit Mine Planning: Analysis and System Modeling of Conventional and Oil Sands Applications**. Thesis (PHD). Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2012.

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

UZAN, A. M. **Estudo de Dimensionamento de Frota de uma Mina a Céu Aberto**. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020.

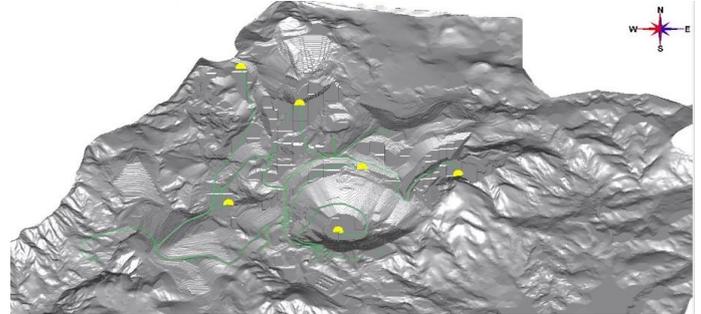
ANEXOS

Anexo A – Sólidos e origens para o ano de 2028.



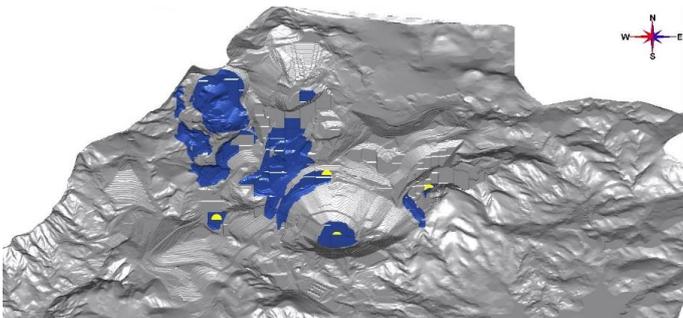
Fonte: Autor (2023).

Anexo A.1 – Trajetos para o ano de 2028.



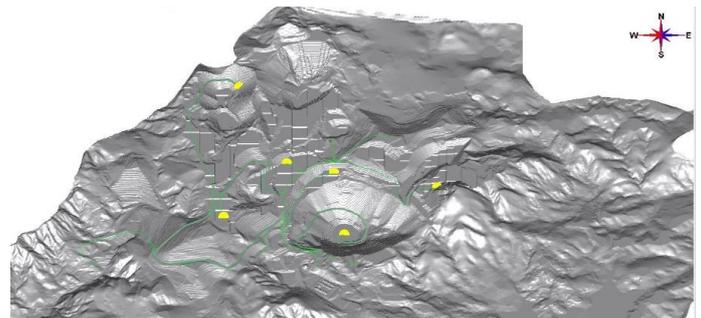
Fonte: Autor (2023).

Anexo A - Sólidos e Origens para o ano de 2029.



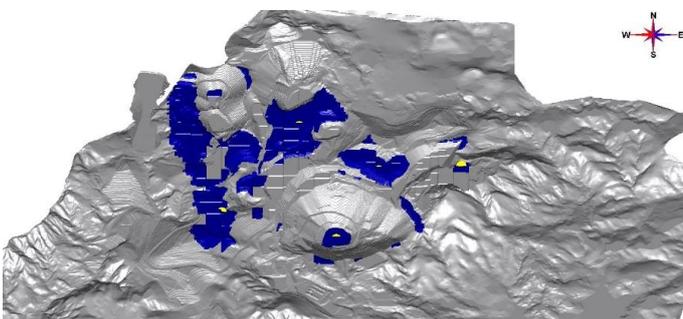
Fonte: Autor (2023).

Anexo B.1 - Trajetos para o ano de 2029



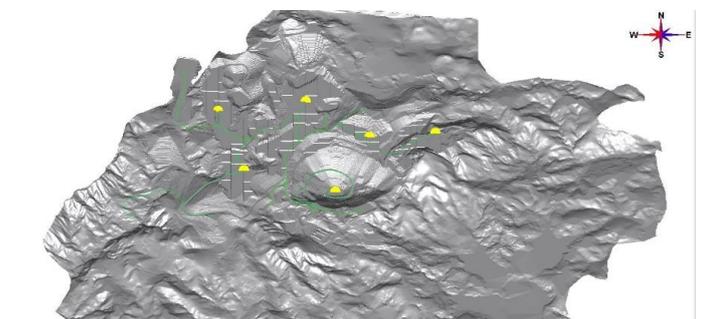
Fonte: Autor (2023).

Anexo B - Sólidos e Origens para o ano de 2030.



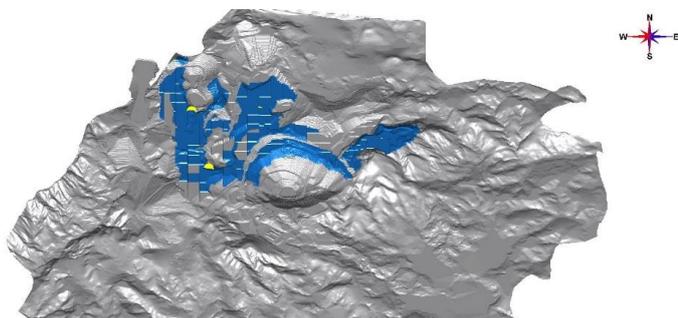
Fonte: Autor (2023).

Anexo C.1 - Trajetos para o ano de 2030.



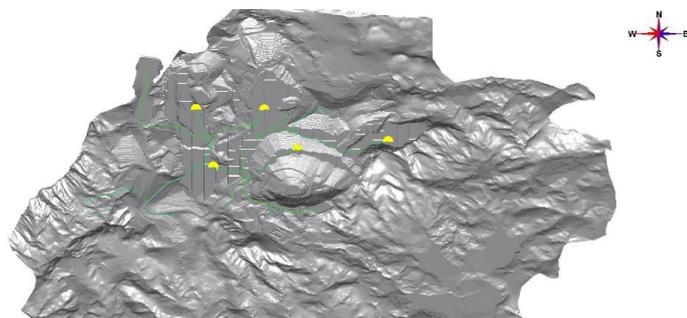
Fonte: Autor (2023).

Anexo C - Sólidos e Origens para o ano de 2031.



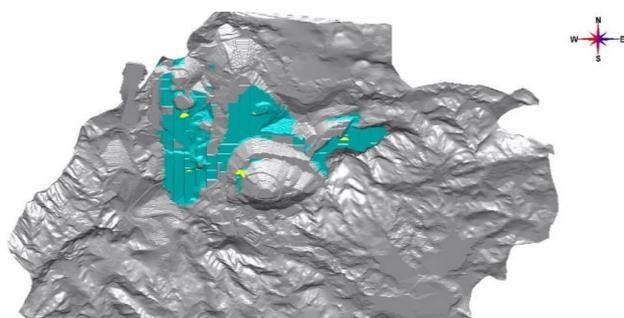
Fonte: Autor (2023).

Anexo D.1 - Trajetos para o ano de 2031



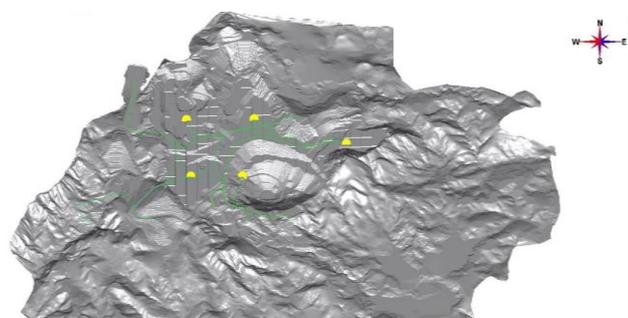
Fonte: Autor (2023).

Anexo D - Sólidos e Origens para o ano de 2032.



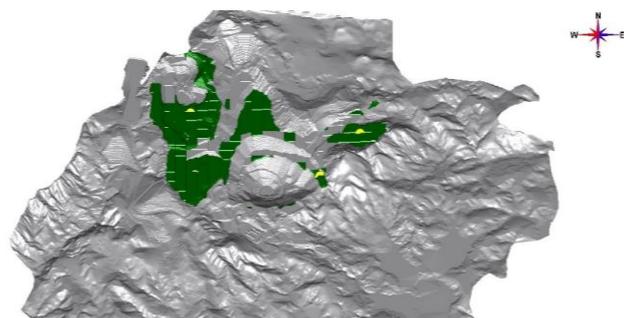
Fonte: Autor (2023).

Anexo E.1 - Trajetos para o ano de 2032.



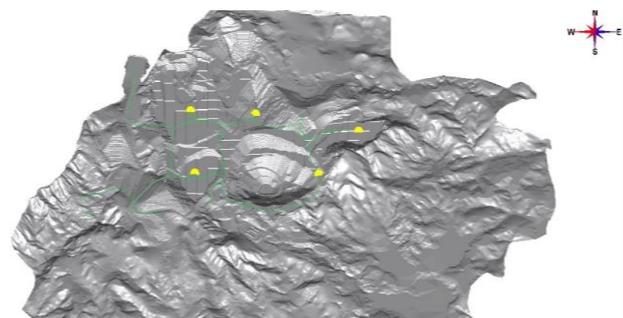
Fonte: Autor (2023).

Anexo E - Sólidos e Origens para o ano de 2033.



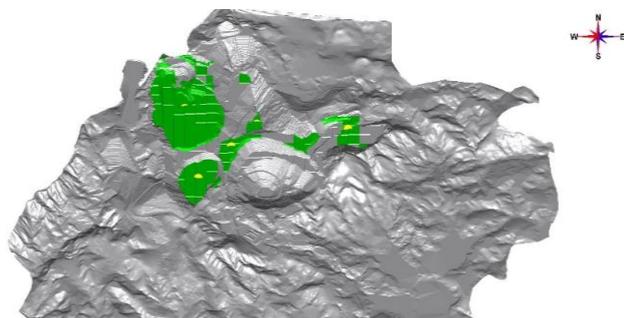
Fonte: Autor (2023).

Anexo F.1 – Trajetos para o ano de 2033.



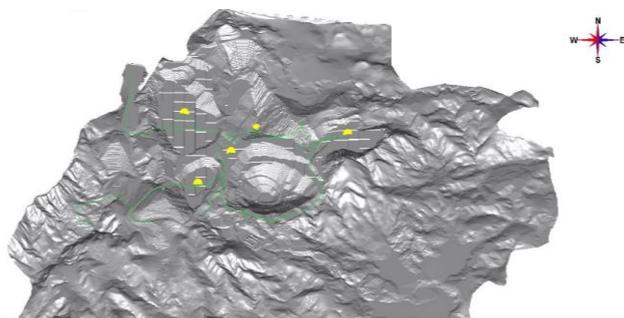
Fonte: Autor (2023).

Anexo F - Sólidos e Origens para o ano de 2034.



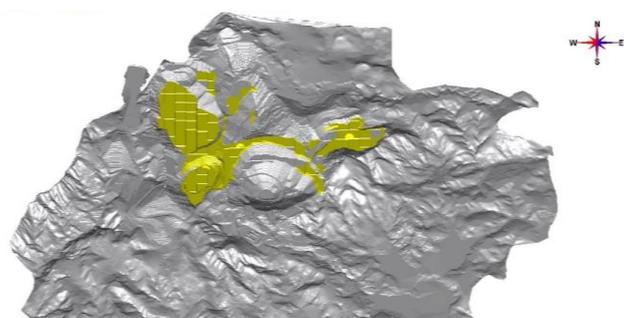
Fonte: Autor (2023).

Anexo G.1 - Trajetos para o ano de 2034.



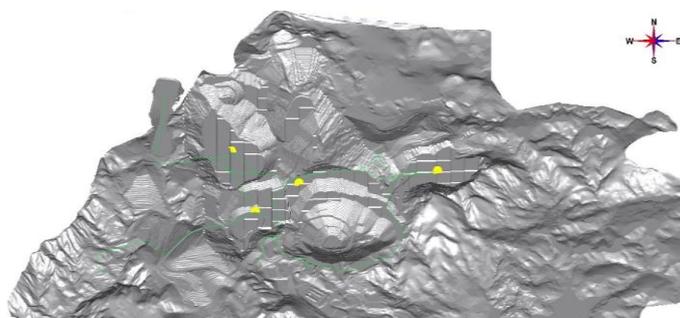
Fonte: Autor (2023).

Anexo G - Sólidos e Origens para o ano de 2035.



Fonte: Autor (2023)..

Anexo H.1 – Trajetos para o ano de 2035.



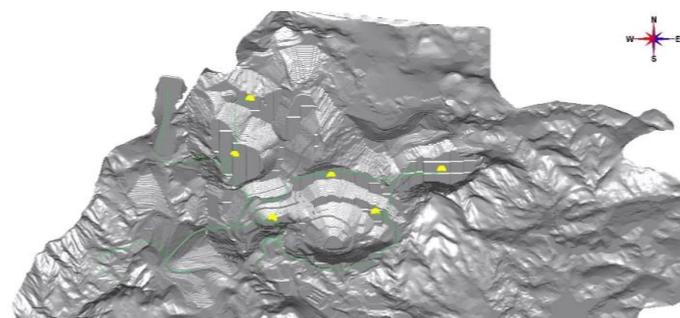
Fonte: Autor (2023).

Anexo H - Sólidos e Origens para o ano de 2036.



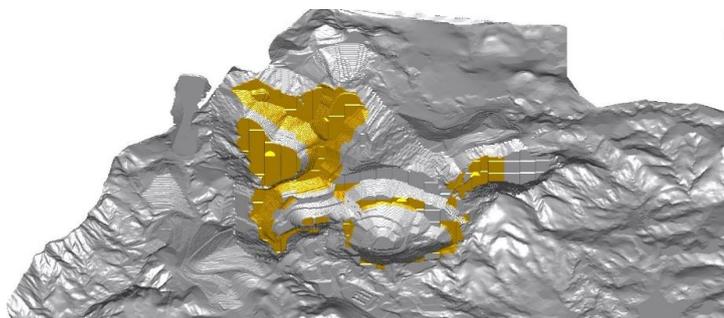
Fonte: Autor (2023).

Anexo I.1 – Trajetos para o ano de 2036.



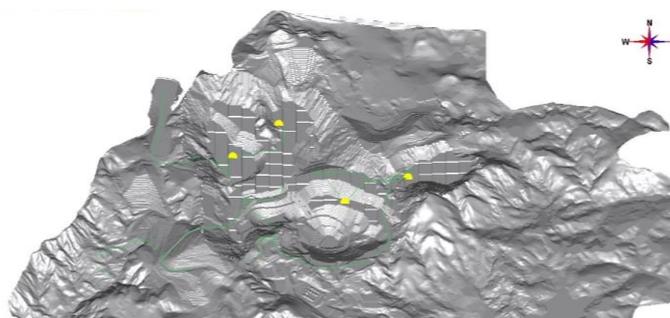
Fonte: Autor (2023).

Anexo I - Sólidos e Origens para o ano de 2037.



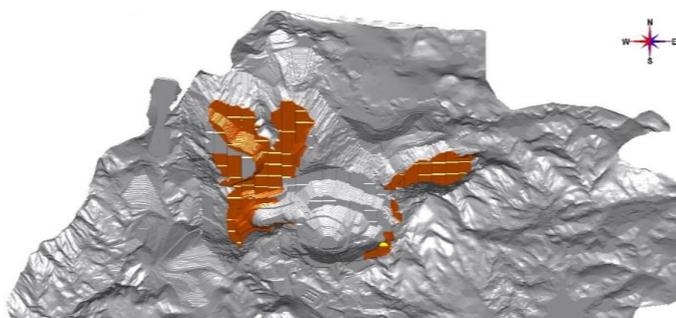
Fonte: Autor (2023).

Anexo J.1 - Trajetos para o ano de 2037.



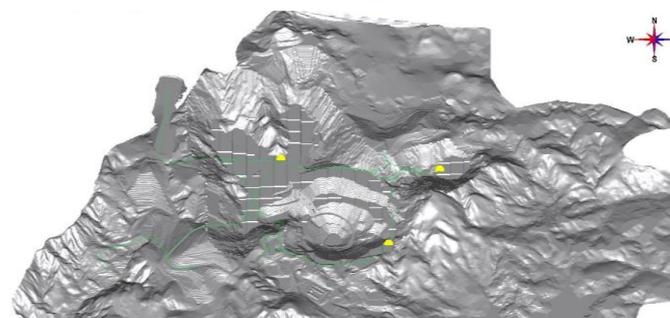
Fonte: Autor (2023).

Anexo J - Sólidos e Origens para o ano de 2038.



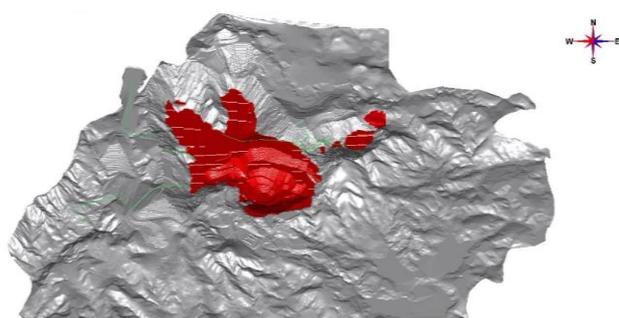
Fonte: Autor (2023).

Anexo K.1 – Trajetos para o ano de 2038.



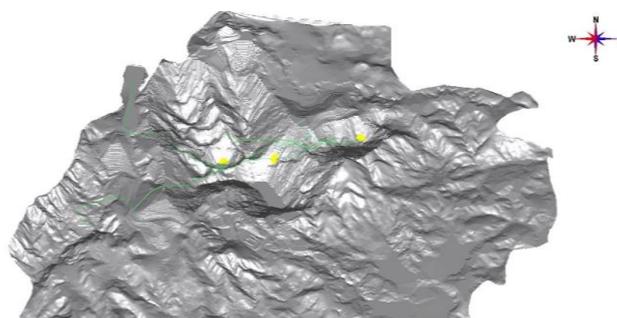
Fonte: Autor (2023).

Anexo K - Sólidos e Origens para o ano de 2039 a 2042.



Fonte: Autor (2023).

Anexo L.1 - Trajetos para o ano de 2039 a 2042.



Fonte: Autor (2023).

Anexo L – Tabela com as movimentações de massa entre cada origem e destino e respectivas distâncias de trajeto obtidas.

	Movimentações entre Origens e Destinos										DMT						
	Pilha de Estéril	P. Central	Pilha 1	Pilha 2	P10	P15	P28	Seco	Empresa X	Total Geral	Pilha de Estéril	P. Central	Pilha 1	Pilha 2	P10	P15	
2028	42.687.019	36.120.000	14.364.224	6.855.482	10.500.000	30.000.000	0	1.915.015	2.237.837	144.679.578	2028	5,55	3,43	2,11	2,63	4,50	3,70
CN_1	9.748.653	26.303.758	9.157.577	2.456.388	5.689.226	13.739.567		1.886.951	2.234.451	71.216.571	CN	5,13	3,29	1,56	1,56	3,96	3,03
CO_1	2.151.478	1.230.294	50.322	765.981	890.900	3.267.675		71		8.356.721	CO	2,91	3,5	3,30	3,30	4,19	3,24
CP	17.159.564	2.118.631	14.273	50.195	525.042	1.876.832		7.520		21.752.056	CP	6,11	2,57	3,67	3,67	3,27	2,45
CP_FUNDO	38.928	2.751.992	370.038	125.026	142.490	594.016		20.416		4.042.906	CP_FUNDO	7,52	2,85	5,08	5,08	3,35	3,86
ENG	1.188.293	1.897.969	4.670.060	3.092.568	2.589.504	6.487.496				19.925.890	ENG	8,00	4,93	2,87	2,87	5,62	4,66
SM_1	12.400.103	1.817.356	101.955	365.323	662.839	4.034.414		56	3.387	19.385.434	SM	5,33	5,65	5,45	5,45	6,33	5,38
2029	72.523.592	36.120.000	5.263.859	290.734	20.000.000	30.000.000	0	0	801.815	165.000.000	2029	5,60	3,90	5,02	5,55	4,77	3,45
CN_2	916.754	4.329.945	629.477	0	3.268.304	5.710.174				14.854.654	CN	5,55	2,00	1,13	1,13	2,96	2,05
CO_1	3.445.287	1.321.620	145.274		807.727	2.569.878				8.289.786	CO	2,87	3,63	3,43	3,43	4,35	3,37
CP	21.017.030	7.697.030	319.803	15.678	4.860.115	9.617.430				43.527.086	CP	5,73	2,19	3,29	3,29	2,83	2,07
CP_FUNDO	290.560	8.847.017	286.032	72.118	1.334.845	1.357.724				12.188.296	CP_FUNDO	7,69	3,01	5,24	5,24	3,52	4,04
ENG	5.320	127.161			223.660	86.511				442.652	ENG	7,46	4,38	2,32	2,32	5,07	4,11
SM_1	46.848.640	13.797.226	3.883.272	202.938	9.146.962	9.355.134			801.815	84.035.989	SM	5,73	6,04	5,84	5,84	6,72	5,79
Retornado					358.387	1.303.149				1.661.536	Retornado					3,48	2,54
2030	77.010.667	18.000.000	15.890.553	6.999.444	20.000.000	30.000.000	31.990.000		109.337	200.000.000	2030	5,02	3,58	3,00	2,85	4,73	3,76
CN_2	20.616.584	4.715.882	3.483.494	1.937.845	4.167.235	5.208.770	8.208.881		63	48.338.754	CN	5,05	2,88	1,75	1,75	3,57	2,60
CO_1	9.299.572	2.575.155	4.533.230	1.551.768	2.789.052	3.959.849	2.458.923			27.167.506	CO	3,46	4,32	3,19	3,19	5,02	4,05
CP	18.526.980	1.792.610		226.096	139.693	258.046	73.533			21.016.958	CP	6,58	3,30	1,43	1,43	3,99	3,02
CP_FUNDO	198.161	4.635.504	208.128	69.288	162.949	213.687	72.969			5.560.685	CP_FUNDO	9,85	3,12	5,44	5,44	3,72	4,22
ENG	316.740		7.217	1.440	25.191	464.213	3.637			818.438	ENG	7,93	4,65	2,78	2,78	5,35	4,38
SM_2	28.052.630	4.280.849	7.658.483	3.213.006	11.660.084	17.007.057	4.712.539		109.274	76.693.922	SM	4,43	4,51	3,99	3,99	5,21	4,24
Retornado					1.055.795	2.888.378	16.459.519			20.403.692	Retornado					3,49	2,52
2031	114.500.736	66.997.700	8.490.287	5.977.335	20.000.000	30.000.000	54.002.300	31.642		300.000.000	2031	4,72	2,96	2,81	2,76	3,65	2,61
CN_2	20.140.687	28.153.005	3.496.027	1.281.522	4.342.499	5.144.506	22.692.227	10.037		85.260.509	CN	3,80	2,71	2,12	2,12	3,41	2,44
CO_1	10.628.409	4.331.057	498.654	1.155.506	3.772.963	7.238.720	3.490.971	16.012		31.132.293	CO	3,21	1,67	2,74	2,74	2,36	1,39
CP_1	37.847.564	6.348.162	208.965	480.084	2.052.666	2.368.791	5.116.823	5.337		54.423.392	CP	5,04	2,25	3,68	3,68	2,95	1,98

Fonte: Autor (2023).

Anexo M – Tabela utilizada com as horas trabalhadas dos equipamentos e respectiva projeção de DF disponibilizada para os equipamentos de transporte.

Plano de Aquisição / Substituição de Equipamentos				2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Prefixo	Situação Atual	Modelo	Horas Trabs. Total												
FROTA CAT-793D															
CM-7901	Ativo	793D	847	29.195	33.732	38.178	42.533	46.800	50.976	55.061	59.056	63.050	67.008	0	
				82,5%	82,2%	80,6%	78,9%	77,3%	75,7%	74,0%	72,4%	72,4%	71,7%	64,0%	
CM-7902	Ativo	793D	6.999	34.793	39.239	43.594	47.861	52.037	56.123	60.117	64.075	68.033	0		
				80,6%	80,6%	78,9%	77,3%	75,7%	74,0%	72,4%	71,7%	71,7%	64,0%		
CM-7904	Ativo	793D	5.738	33.766	38.212	42.567	46.834	51.010	55.096	59.090	63.085	67.042	0		
				82,2%	80,6%	78,9%	77,3%	75,7%	74,0%	72,4%	72,4%	71,7%	64,0%		
CM-7905	Ativo	793D	1.433	29.638	34.175	38.621	42.976	47.243	51.419	55.505	59.499	63.494	67.451	0	
				82,2%	82,2%	80,6%	78,9%	77,3%	75,7%	74,0%	72,4%	72,4%	71,7%	64,0%	
CM-7906	Ativo	793D	6.870	34.664	39.110	43.465	47.732	51.908	55.994	59.988	63.983	67.940	0		
				80,6%	80,6%	78,9%	77,3%	75,7%	74,0%	72,4%	72,4%	71,7%	64,0%		
CM-7907	Ativo	793D	47.252	0	64,0%										
CM-7908	Ativo	793D	6.115	34.019	38.465	42.819	47.087	51.263	55.348	59.343	63.337	67.295	0		
				82,2%	80,6%	78,9%	77,3%	75,7%	74,0%	72,4%	72,4%	71,7%	64,0%		
CM-7910	Ativo	793D	6.889	34.683	39.129	43.484	47.751	51.927	56.013	60.007	63.965	67.923	0		
				80,6%	80,6%	78,9%	77,3%	75,7%	74,0%	72,4%	71,7%	71,7%	64,0%		

Fonte: Autor (2023).

Plano de Aquisição / Substituição de Equipamentos				2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Escavadeiras Caterpillar CAT6060																		
ES-6001	Ativo	CAT6060FS	32.339	53.635	57.152	60.621	64.090	67.510	70.931	74.352	77.725	0						
				73,0%	73,0%	72,0%	72,0%	71,0%	71,0%	71,0%	70,0%	70,0%	70,0%					
ES-6002	Ativo	CAT6060FS	34.755	56.002	59.471	62.940	66.409	69.830	73.251	76.623	79.996	0						
				73,0%	72,0%	72,0%	72,0%	71,0%	71,0%	70,0%	70,0%	70,0%	70,0%					
ES-6003	Ativo	CAT6060FS	34.396	55.643	59.112	62.581	66.050	69.471	72.892	76.264	79.637	0						
				73,0%	72,0%	72,0%	72,0%	71,0%	71,0%	70,0%	70,0%	70,0%	70,0%					
ES-6004	Ativo	CAT6060FS	31.901	53.197	56.714	60.183	63.652	67.072	70.493	73.914	77.287	0						
				73,0%	73,0%	72,0%	72,0%	71,0%	71,0%	71,0%	70,0%	70,0%	70,0%					
Número de Equipamentos a Substituir				0	0	0	0	0	0	0	0	4						
Número de Equipamentos Disponíveis				4	4	4	4	4	4	4	4	0						

DF Esc.Hidr. 70t 2017	E	73%	72%	72%	71%	71%	70%	70%	66%	64%	62%							
DF Esc.Hidr. 70t 2018	E	73%	73%	72%	72%	71%	71%	70%	70%	66%	64%	62%						
DF Esc.Hidr. 70t 2019	E	74%	73%	73%	72%	72%	71%	71%	70%	70%	66%	64%	62%					
DF Esc.Hidr. 70t 2020	E	74%	74%	73%	73%	72%	72%	71%	71%	70%	70%	66%	64%	62%				
DF Esc.Hidr. 70t 2021	E	74%	74%	74%	73%	73%	72%	72%	71%	71%	70%	70%	66%	64%	62%			
DF Esc.Hidr. 70t 2022	E	75%	74%	74%	74%	73%	73%	72%	72%	71%	71%	70%	70%	66%	64%	62%		
DF Esc.Hidr. 70t 2023	E	75%	75%	74%	74%	74%	73%	73%	72%	72%	71%	71%	70%	70%	66%	64%	62%	
DF Esc.Hidr. 70t 2024	E	75%	75%	75%	74%	74%	74%	73%	73%	72%	72%	71%	71%	70%	70%	66%	64%	62%
DF Esc.Hidr. 70t 2025	E	76%	75%	75%	75%	74%	74%	74%	73%	73%	72%	72%	71%	71%	70%	70%	66%	64%

Anexo N - Tabela utilizada com as horas trabalhadas dos equipamentos e respectiva projeção de DF disponibilizada para os equipamentos de carga.

	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Movimentação Total	169.984	192.336	225.400	330.000	346.500	346.500	346.500	346.500	347.305	337.681	346.500	423.500	423.500	422.625	180.614
Produção de Mina	144.680	165.000	200.000	300.000	315.000	315.000	315.000	315.000	315.732	306.983	315.000	385.000	385.000	384.205	164.195
OM	25.304	27.336	25.400	30.000	31.500	31.500	31.500	31.500	31.573	30.698	31.500	38.500	38.500	38.420	16.419
Capacidade Excedente (%)	2%	4%	2%	16%	9%	7%	4%	3%	6%	8%	4%	4%	3%	2%	75%
Capacidade Excedente	2.627	8.113	4.899	54.373	30.757	22.965	15.437	11.871	20.670	27.085	14.006	15.694	11.904	7.040	134.901
PC 5500 - Atual															
CAT6060	38.954	39.219	38.689	38.424	38.159	38.159	37.629	37.629							
994H															
Escavadeiras Hidráulicas Novas	79.352	89.470	112.308	232.276	227.795	222.158	217.099	215.365	263.352	261.328	257.715	328.106	325.070	320.301	307.003
Carregadeiras Novas	54.305	71.760	79.303	113.674	111.304	109.149	107.209	105.378	104.623	103.438	102.792	111.088	110.334	109.364	8.512
Capacidade da Frota	172.611	200.449	230.299	384.373	377.257	369.465	361.937	358.371	367.975	364.766	360.506	439.194	435.404	429.665	315.515
Capacidade Total da Frota	172.611	200.449	230.299	384.373	377.257	369.465	361.937	358.371	367.975	364.766	360.506	439.194	435.404	429.665	315.515
ANO															
PC 5500 - Atual															
CAT6060	ESC	4	4	4	4	4	4	4							
994H	CAR														
Escavadeiras Hidráulicas Novas	ESC	7	8	10	20	20	20	20	24	24	24	30	30	30	29
Carregadeiras Novas	CAR	6	8	9	13	13	13	13	13	13	13	14	14	14	1
Escavadeiras	Un.	11	12	14	24	24	24	24	24	24	24	30	30	30	29
Carregadeiras	Un.	6	8	9	13	13	13	13	13	13	13	14	14	14	1
Total de Equipamentos de Carga		17	20	23	37	37	37	37	37	37	37	44	44	44	30
Horas disponíveis por ano		8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760

Anexo O – Tabela de projeção da capacidade das frotas de carregamento.

	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Movimentação Total	169.984	192.336	225.400	330.000	346.500	346.500	346.500	346.500	347.305	337.681	346.500	423.500	423.500	422.625	180.614
TOTAL EQUIPAMENTOS	87	109	118	157	157	157	157	157	197	210	210	216	216	216	203
Capacidade Excedente	11.916	13.110	7.824	22.674	23.291	13.761	77.105	70.248	83.316	56.835	92.875	19.514	7.917	1.632	214.672
Capacidade Excedente (%)	7%	7%	3%	7%	7%	4%	22%	20%	24%	17%	27%	5%	2%	0%	119%
Ano															
CAT 793 D	32.983	29.025	28.866	16.842	19.032	18.278	21.802	21.410	17.323	13.547					
CAT 793 F - Séries 1 e 2	75.239	65.634	68.514	60.938	9.049										
Frota Nova	73.678	110.787	135.844	274.894	341.710	341.983	401.803	395.338	413.298	380.969	439.375	443.014	431.417	424.257	395.286
Capacidade da Frota	181.900	205.446	233.224	352.674	369.791	360.261	423.605	416.748	430.621	394.516	439.375	443.014	431.417	424.257	395.286
Capacidade Total da Frota	181.900	205.446	233.224	352.674	369.791	360.261	423.605	416.748	430.621	394.516	439.375	443.014	431.417	424.257	395.286
Horas totais	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760
Ano															
CAT 793 D	17	17	17	9	9	9	9	9	9	9					
CAT 793 F - Séries 1 e 2	38	38	38	32	5										
Frota Nova	32	54	63	116	143	148	148	148	188	201	210	216	216	216	203
TOTAL EQUIPAMENTOS	87	109	118	157	157	157	157	157	197	210	210	216	216	216	203

Anexo P - Tabela de projeção da capacidade da frota de transporte.