CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – UNIDADE ARAXÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL

AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DA OPERAÇÃO UNITÁRIA DE TRANSPORTE ATRAVÉS DO USO DE TELEMETRIA PARA UMA MINA NA REGIÃO DO ALTO PARANAÍBA - MG

PATRICK TEIXEIRA OLIVEIRA

ARAXÁ – MINAS GERAIS
2022

PATRICK TEIXEIRA OLIVEIRA

AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DA OPERAÇÃO UNITÁRIA DE TRANSPORTE ATRAVÉS DO USO DE TELEMETRIA PARA UMA MINA NA REGIÃO DO ALTO PARANAÍBA - MG

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus Araxá como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Marcélio Prado Fontes.
Coorientador: Msc. Walter Schmidt Felsch Junior.

Linha de pesquisa: Geologia de Engenharia na Mineração.

ARAXÁ – MINAS GERAIS
2022

Oliveira, Patrick Teixeira.
O48a Aumento da produtividade da operação unitária de transporte através do uso de telemetria para uma mina na região do Alto Paranaíba - MG / Patrick Teixeira Oliveira. – 2022.
91 f. : il.

Orientador: Marcélio Prado Fontes.
Coorientador: Walter Schmidt Felsch Junior.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas.
Bibliografia.

1. Minas e Mineração – Teses. 2. Lavra de Minas – Teses. 3. Telemetria – Teses. 4. Estradas – Teses. I. Fontes, Marcélio Prado. II. Feisch Junior, Walter Schmidt. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 622.2(815.1)

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Márcia Martins da Silva CRB-6/2578

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIADE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL – ARAXÁ - MG

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

Aos 10 (dez) dias do mês de fevereiro do ano de 2022 (Dois Mil e Vinte e Dois), às 19:00 horas, na plataforma *Microsoft Teams*, foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação do Mestrando Patrick Teixeira Oliveira, sendo a banca examinadora composta pelo Prof. Dr. Marcélio Prado Fontes (Presidente) – PPGEMIN/CEFET-MG, Walter Schmidt Felsch Junior (Coorientador)– (UFOP), Michel Melo Oliveira (Membro) – UFMG, Luciano Nunes Capponi (Membro) – (Mosaic Fertilizantes). Dando início aos trabalhos o(a) Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as sessões de Defesa de Dissertação, concedeu ao Mestrando Patrick Teixeira Oliveira, até 40 (quarenta) minutos para a apresentação do seu trabalho intitulado "AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DA OPERAÇÃO UNITÁRIA DE TRANSPORTE ATRAVÉS DO USO DE TELEMETRIA PARA UMA MINA NA REGIÃO DO ALTO PARANAÍBA - MG", na Área de Concentração: Engenharia de Minas e Linha de Pesquisa: Geologia De Engenharia Na Mineração. Terminada a exposição, o(a) Presidente da Banca examinadora passou a arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, o (a) Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que o Mestrando foi aprovado, por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo Mestrando.

Araxá, 10 de fevereiro de 2022

Presidente: Marcélio Prado Fontes

Coorientador(a): Walter Schmidt Felsch Junior

Membro: Michel Melo Oliveira

Membro: Luciano Nunes Capponi

Discente: Patrick Teixeira Oliveira

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido forças e motivação para sempre seguir em frente na busca pelo conhecimento. Aos meus pais Luiz e Maria, minha irmã Patrícia e minha namorada e grande companheira Gabriela por terem sempre me apoiado, incentivado e acreditado em mim.

Aos professores do CEFET-MG e colegas de trabalho, que tive a prazerosa oportunidade de aprender bastante ao longo dos últimos anos e que me mostraram que o aprendizado é muito importante e nunca termina.

Ao meu orientador Marcélio, e os professores Natal Pires, Michel Melo, que desde a graduação contribuíram bastante para meu crescimento profissional e pessoal.

Aos meus amigos e familiares pelo apoio continuo.

RESUMO

A competividade que as empresas enfrentam no mercado se torna cada dia mais intensa, por isso, é de grande importância que os processos sejam executados com eficiência, minimizando perdas. Na mineração a fase de explotação permite redução dos custos com uma boa gestão das operações de carregamento e transporte de minério e estéril para as etapas subsequentes do processo produtivo. O transporte desses materiais é feito em sua grande maioria por caminhões, os quais a produtividade é diretamente influenciada pela velocidade média. Este trabalho definiu, criou ferramentas e *dashboards* para gestão da velocidade média. Sendo assim, possibilitando uma melhor gestão do desempenho da equipe, mapeamento e atuação em campo para melhorias nas condições dos acessos. Os resultados do trabalho mostraram um aumento de produtividade de 13% para a frota Caterpillar e 10,8% para a frota Komatsu, levando a uma economia de R$ 3,078 milhões nos custos operacionais. Também foram identificados melhoria nas condições de segurança e ergonomia das vias e direcionamento padronizado dos recursos de manutenção dos acessos.

Palavras-chave: Operação de Mina, Telemetria, Infraestrutura de Mina, Estradas.

ABSTRACT

The competitiveness that companies face in the market becomes more and more intense, so it is of great importance that processes are carried out efficiently, minimizing losses. In mining, the exploration phase allows for cost reduction with good management of ore and waste loading and transport operations for the subsequent stages of the production process. The transport of these materials is mostly done by trucks, whose productivity is directly influenced by the average speed. This work defined, created tools and dashboards for managing average speed. Thus, enabling better management of team performance, mapping and field work to improve access conditions. The results of the work showed an increase in productivity of 13% for the Caterpillar fleet and 10.8% for the Komatsu fleet, leading to savings of R$3.078 million in operating costs. Improvements were also identified in the safety and ergonomics of the roads and standardized direction of access maintenance resources.

Keywords: Mine operation, telemetry, mine infrastructure, haulage roads.

.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Lavra a céu aberto. 23
Figura 2 – Ciclo de Transporte. 26
Figura 3 – Largura de acessos. 29
Figura 4 – Altura da leira de segurança. 29
Figura 5 – Gradiente. 30
Figura 6 – Gradiente em rampas. 31
Figura 7 – Curva de *rimpull* para caminhões de 200 t. 31
Figura 8 – Abaulamento de pistas. 32
Figura 9 – Buracos na pista. 33
Figura 10 – Poeira. 34
Figura 11 – Níveis de severidade de corrugação. 35
Figura 12 – Níveis de severidade de trilhas de roda. 36
Figura 13 – Custo total mínimo e frequência de manutenção necessária. 38
Figura 14 – Gravidade de defeitos em estradas. 39
Figura 15 – Gravidade de defeitos em estradas. 40
Figura 16 – Estimativa de resistência ao rolamento. 45
Figura 17 – Sistema VIMS. 47
Figura 18 – Sistema de monitoramento e gestão de frota 51
Figura 19 – Registro de velocidade. 56
Figura 20 – Arquivo gerado pela macro. 58
Figura 21 – Importação dos registros de velocidade. 59
Figura 22 – Legenda do mapa de calor de velocidade. 59
Figura 23 – Padronização e implantação do mapa de velocidade. 60
Figura 24 – *Boxplot* de velocidade sem tratativa. 63
Figura 25 – *Boxplot* de velocidade com tratativa. 64
Figura 26 – Mapa de calor de velocidade. 65
Figura 27 – RDS de estradas primárias e secundárias. 66
Figura 28 – Resistência ao rolamento para vias primárias e secundárias. 67
Figura 29 – Revestimento da via. 69
Figura 30 – Acompanhamento do mapa de calor de velocidade. 70
Figura 31 – Evolução com o uso do mapa de calor de velocidade. 71
Figura 32 – Relatório de velocidade dentro do caminhão. 72

Figura 33 – Gestão a vista de velocidade média. 73
Figura 34 – Gestão a vista de velocidade média. 73
Figura 35 – Teste de normalidade. 75
Figura 36 – *Boxplot* de velocidade média 2019 com *outlier*. 76
Figura 37 – *Boxplot* de velocidade média 2019. 77
Figura 38 – Histograma velocidade média 2019. 78
Figura 39 – *Boxplot* de velocidade média 2020. 79
Figura 40 – Histograma velocidade média 2020. 79
Figura 41 – *Boxplot* de velocidade média 2021. 80
Figura 42 – Histograma velocidade média 2021. 80
Figura 43 – Evolução histograma velocidade média. 81

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Categorias de manutenção e atividades para estradas de transporte de minas. 37
Tabela II – Extensão dos defeitos. 41
Tabela III – Avaliação funcional de acessos. 41
Tabela IV – Avaliação de resistência ao rolamento de acessos. 43
Tabela V – Extensão dos defeitos 44
Tabela VI – Categorias de manutenção e atividades para estradas de transporte de minas. 57
Tabela VII – Média pluviometria histórica 1984 a 2020. 61
Tabela VIII – Velocidade máxima conforme inclinação de acesso. 68
Tabela IX – Atuações feitas nos acessos. 69
Tabela X – Estatísticas descritivas 2019. 77
Tabela XI – Estatísticas descritivas 2020. 79
Tabela XII – Estatísticas descritivas 2021. 80
Tabela XIII – Estatísticas descritivas. 81
Tabela XIV – Teste de hipótese CR. 82
Tabela XV – Teste de hipótese KM. 82
Tabela XVI – Dados para cálculo de produtividade. 83
Tabela XVII – Aumento de produtividade (t/h). 83
Tabela XVIII – Ganho com o aumento de produtividade (R$). 83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CM – Carga média

CR – Caterpillar

DF – Disponibilidade física

DMT – Distância Média de Transporte

ECM – (*Electronic Control Module*) Módulo de Controle Eletrônico

EVM (*Empty Vehicle Mass*) Massa do Veículo Vazio

FMS – (*Fleet Managing System*) Sistema de Gerenciamento de Frota

GVM (*Gross Vehicle Mass*) Massa do Veículo Cheio

HM – Horas de manutenção

HP – Horas planejadas

HT – Horas trabalhadas

KPI – (*Key Performance Indicator*) Indicador Chave de Desempenho

KM – Komatsu

NR – Norma Regulamentadora

PD – Produção

PH – Produtividade

RAC – (*Road Analysis Control*) Controle de Análise de Estrada

RDS – Rugosidade Total

TB – Tempo de basculamento

TC – Tempo de carregamento

TFB – Tempo de fila para bascular

TFC – Tempo de fila para carregar

TMB – Tempo de manobra para bascular

TMC – Tempo de manobra para carregar

UF – Utilização física

VIMS – (*Vital Information Managing System*) Sistema de Gerenciamento de Informações Vitais

VM – Velocidade média

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 Justificativa 18
1.2 Objetivos 19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 21
2.1 Lavra de mina a céu aberto 21
2.1.1 Métodos de lavra 21
2.1.2 Perfuração e desmonte 23
2.1.3 Carregamento e transporte 24
2.2 Infraestrutura de mina 27
2.2.1 Acessos de mina 27
2.2.2 Projeto dos acessos de mina 28
2.2.2.1 Largura 28
2.2.2.2 Leiras de segurança 29
2.2.2.3 Gradiente 30
2.2.2.4 Inclinação transversal 32
2.2.3 Tipos de defeitos em acessos 33
2.2.4 Avaliação e manutenção de acessos 37
2.2.4.1 Avaliação funcional 38
2.2.4.2 Resistência ao rolamento 42
2.3 Telemetria aplicada na mineração 46
2.3.1 Caterpillar RAC e VIMS 47
2.4 Sistemas de gerenciamento de frota 48
2.5 Indicadores de desempenho 51
2.5 Relatórios e ferramentas de análise de desempenho 54
3 METODOLOGIA DE PESQUISA 55
3.1 Natureza e classificação da pesquisa 55
3.2 Procedimentos metodológicos 56
3.2.1 Definição de uma ferramenta 56
3.2.1.1 Levantamento de dados 56
3.2.1.2 Tratamento dos dados 57
3.2.1.3 Importação dos dados no software de planejamento de mina 58
3.2.1.4 Definição de uma legenda 59

3.2.2 Definição de máxima velocidade por trechos 59
3.2.3 Padronização e implantação do uso da ferramenta 60
3.2.4 Adequações de acessos 60
3.2.5 Relatórios para gestão da velocidade média 60
3.2.6 Considerações para análises estatísticas 61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 63
4.1 Mapa de calor de velocidade 63
4.1.1 Tratativa dos dados 63
4.1.2 Mapa 64
4.2 Velocidade máxima por trecho 65
4.3 Adequações de vias 68
4.4 Relatórios para gestão da velocidade 71
4.5 Análises estatísticas 74
4.5.1 Ano 2019 74
4.5.2 Anos 2020 e 2021 78
4.5.3 Aumento de velocidade média 81
4.6 Aumento de produtividade 82
4.7 Impacto financeiro 83
4.8 Demais ganhos 84
5 CONCLUSÕES 85
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 86
REFERÊNCIAS 87

1 INTRODUÇÃO

O mercado se torna a cada dia mais competitivo, empresas mineradoras buscam constantemente novas formas de reduzir custos e otimizar seus processos, desde a lavra até o tratamento de minérios (BALARAJU; GOVINDA RAJ; MURTHY, 2019). Uma das principais fases da mineração é a operação de lavra, na qual o objetivo é extrair o material da jazida e transportá-lo para os pontos de descarga, sendo os mais comuns as pilhas de estéril, as pilhas de minério e o britador (BOTELHO, 2014; NEWMAN *et al*., 2010).

Atualmente, o método de lavra à céu aberto é o mais utilizado na mineração. Este método possui como características as operações unitárias de carregamento e transporte. Estas duas operações apresentam elevado custo operacional devido aos gastos com insumos, principalmente óleo diesel e manutenção. Estas operações geralmente são feitas por escavadeiras ou carregadeiras e caminhões de pequeno à grande porte. O desempenho desses equipamentos impacta diretamente na produção e custo (CORONADO, 2014; COUTINHO, 2017; RODOVALHO; LIMA; TOMI, 2016).

A operação de transporte se inicia com a alocação dos caminhões nas frentes de lavra de minério e/ou estéril transportando esses materiais para seus destinos sejam depósitos ou britadores. No caso do transporte de minério sempre se deve atentar para garantir a alimentação do britador e a operação contínua da usina de tratamento de minério (QUEVEDO, 2009). Por gerar um elevado custo operacional, a operação de transporte deve ser gerida buscando sempre um alto desempenho com segurança. Para uma boa performance os caminhões precisam estar bem dimensionados com a manutenção em dia, os acessos da mina estar conforme o projeto e os operadores apresentar bom desempenho.

Segundo Teixeira (2016), a qualidade dos acessos impacta diretamente o desempenho dos equipamentos de transporte e o conforto dos operadores. A falta de manutenção periódica nos acessos resulta na redução de velocidade dos equipamentos pelos operadores, impactando negativamente a produtividade da frota. Diversos problemas podem ser encontrados nos acessos quando estes não recebem manutenção adequada. Dentre eles destacam material solto, corrugação, buracos, trilhas de roda, trincas, fissuras, problemas de drenagem, dentre outros (FERREIRA, 2007; THOMPSON, R. J.; VISSER, 2000). Para que as pistas possibilitem condições para que os caminhões apresentem um desempenho dentro do

esperado, é necessário que a construção e o plano de manutenção dos acessos estejam conforme o projeto de estradas da mina, garantindo tanto a parte geométrica quanto estrutural da via.

Além da condição de mina, um ponto importante para garantir uma boa eficiência da operação unitária de transporte é a gestão dos indicadores de desempenho da frota. Essa gestão pode ser feita usando dados da telemetria embarcada dos caminhões e do sistema de gerenciamento da frota. Esses sistemas apresentam comunicação em tempo real, registrando todos os dados dos equipamentos em banco de dados. Com esses dados pode-se criar relatórios e *dashboards* que facilitem a gestão e tomada de decisão em campo no dia a dia da operação.

A mina alvo do estudo está localizada na região do Alto Paranaíba em Minas Gerais. Para o transporte de minério e estéril são utilizadas duas frotas de caminhões de grande porte, Caterpillar e Komatsu. Para um processo sustentável com alto desempenho, esses caminhões precisam operar dentro dos indicadores projetados no projeto da mina.

1.1 Justificativa

Para uma melhor performance dos equipamentos de transporte é essencial que os acessos da cava possibilitem uma operação produtiva e eficiente (FELSCH-JUNIOR *et al*., 2018; RODOVALHO, 2013). Para propiciarem condições de bom desempenho para a frota, as estradas devem receber atuação de equipamentos de infraestrutura como motoniveladoras, tratores, caminhões pipa, retro-escavadeiras de pequeno porte, entre outros que fazem parte das operações auxiliares. O direcionamento desses recursos geralmente é feito por técnicos e supervisores em campo com base em seus conhecimentos técnicos e experiência operacional, o que dá a tomada de decisão uma parcela de subjetividade. Para um direcionamento mais acurado dos recursos de manutenção de vias, o ideal, é que se tenha uma visão dos locais na mina onde as condições dos acessos estão mais críticas, e assim direcionar a atuação conforme prioridade. O uso de informações automatizadas sobre as condições de vias possibilita uma tomada de decisão objetiva e direcionada. Esses dados podem ser obtidos com o uso de *softwares* e ferramentas matemáticas (RODOVALHO, 2013).

O sistema de gerenciamento de frota permite a análise pontual de velocidade média dos caminhões ao longo das estradas. Com isso possibilita a identificação de trechos problemáticos nas estradas que causam danos estruturais aos equipamentos e ergonômicos ao operador, impactando em produtividade, custo e segurança (HOLMAN, 2006). A velocidade tem grande impacto na produtividade dos caminhões e por isso o direcionamento da manutenção de vias deve ser preciso, acurado e objetivo.

O aumento de produtividade reduz o custo de produção impactando nas etapas subsequentes, visto que a operação de lavra é uma das etapas iniciais da cadeia produtiva. A operação unitária de transporte é diretamente influenciada pela condição dos acessos da mina, trechos com baixa aderência ao projeto de estradas impactam na vida útil dos equipamentos, na ergonomia e segurança para o operador, na produtividade e custo de lavra. Com uma ferramenta de análise pontual de velocidade nas estradas da mina é possível identificar e atuar em trechos específicos. A abordagem desenvolvida neste trabalho possui foco no aumento da produtividade da frota de caminhões por meio da elaboração de uma ferramenta de análise e direcionamento de recursos de manutenção de vias, bem como a elaboração de relatórios para gestão da velocidade média.

Este trabalho se justifica diante da necessidade de uma ferramenta para acelerar a identificação de problemas nos acessos e aumentar a acuracidade da atuação dos recursos de manutenção de acessos, bem como a importância da gestão do indicador de velocidade média através de relatórios. Essas questões possibilitam ganho de produtividade e redução de custo além de todos os ajustes nas praças de carregamento, estradas e depósitos resultarem em uma atividade mais segura para todos os trabalhadores envolvidos. É importante ressaltar que a velocidade média buscada está dentro dos limites de segurança para a operação de acordo com o projeto da estrada.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é aumentar a produtividade da frota de transporte por meio de aumento de velocidade média, na operação de uma mina na região do Alto Paranaíba em Minas Gerais.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver ferramenta para identificação de pontos de baixa velocidade nos acessos;
- Criar relatórios para gestão e acompanhamento do indicador de velocidade média;
- Melhorar a segurança da mina;
- Diminuir o custo operacional;
- Desenvolvimento da equipe operacional.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção apresenta o embasamento teórico necessário à compreensão da pesquisa. São abordados conceitos da lavra de mina a céu aberto como operações mineras, infraestrutura de mina, conceito sobre a telemetria e aplicações em operações mineiras.

2.1 Lavra de mina a céu aberto

Segundo o código brasileiro de mineração, a lavra, pode ser definido como o conjunto de operações que possuem o objetivo de aproveitar industrialmente uma jazida. O processo visa a explotação de minério e estéril para o destino final como britador e pilha de estéril, respectivamente. A execução pode ser feita pelos métodos a céu aberto e/ou subterrâneo. Existem fatores a serem considerados para a escolha do método tais como: geometria e profundidade do corpo de minério; condições geotécnicas; recuperação de minério; seleção de equipamentos; mão de obra; condições de saúde e segurança; capital e custos operacionais; impacto ambiental durante e depois; requisitos e custos de fechamento e recuperação de mina (DARLING, 2011).

2.1.1 Métodos de lavra

A lavra a céu aberto é realizada quando o corpo de minério está localizado próximo a superfície, no método subterrâneo o minério está em profundidades maiores e necessita maior seletividade na extração. Algumas jazidas são lavradas inteiramente pelo método a céu aberto, outras exclusivamente pelo método subterrâneo e em alguns casos a lavra é iniciada pelo primeiro método e terminada pelo segundo. O método de lavra a céu aberto é mais antigo e mais produtivo do que o subterrâneo, especialmente por não haver muitas restrições com relação ao porte dos equipamentos de lavra. Um ponto de grande impacto na lavra a céu aberto é a influência do clima na continuidade operacional, como interferência de chuva, neve, neblina, etc. (DARLING, 2011; NEWMAN *et al*., 2010; RODOVALHO *et al*., 2019).

A seleção do método de lavra é feita considerando principalmente a geometria e profundidade do corpo de minério. Com base no modelo de blocos determina o teor de corte, valor que separa minério de estéril e define a relação estéril/minério (massa ou volume de material estéril que é removida para liberar uma unidade de massa ou volume de minério). Com

base nas características do minério, heterogeneidade da jazida, modelo de blocos e custo é determinado o projeto de lavra definindo os equipamentos e instalações (NEWMAN *et al*., 2010).

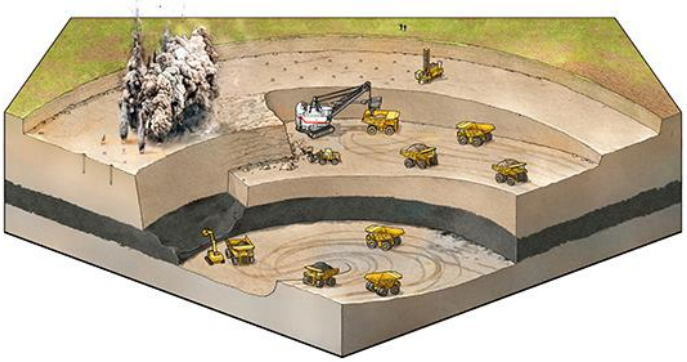
Os principais métodos de a céu aberto, na forma sólida, são a lavra em bancadas, lavra em tiras e a lavra de rochas / minerais industriais (MRI). No primeiro método a lavra é sequenciada de cima para baixo em bancadas, geralmente com altura de 10 a 15 metros, inicialmente é removido o capeamento que pode ser uma camada mais espessa e sequenciado descendo a lavra em bancos até atingir os níveis onde estão o minério. O material estéril é depositado em pilhas previamente preparadas o mais perto possível da cava ou em áreas já lavradas e o minério é explotado para a britagem ou pilhas de estoque. O método por bancos é utilizado principalmente em depósitos de minérios metálicos (BLOM; PEARCE; STUCKEY, 2019; CURI, 2014; NEWMAN *et al*., 2010).

Característico de jazidas de bauxita, carvão e xisto betuminoso, o método de tiras é mais observado em depósitos em que o corpo de minério possui uma forma tabular e está horizontalmente distribuído tendo uma menor espessura de capeamento. Essas características são propícias para produção em grande escala com uso de *draglines*, mineradores contínuos e *shovels*.

O terceiro tipo e um dos mais antigos é a lavra de MRI que também pode ser chamada de produção de granulados. Esse método fornece materiais para construção civil, como rochas ornamentais, é geralmente aplicado para calcário, gnaisses e granito (CURI, 2014; DARLING, 2011).

Segundo Amaral e Pinto (2009), quatro atividades caracterizam a operação de lavra em minas a céu aberto: perfuração, desmonte, carregamento e transporte, Figura 1.

Figura 1 – Lavra a céu aberto.



Fonte: SUEK (2020).

2.1.2 Perfuração e desmonte

Em alguns casos o material na frente de lavra apresenta compactação que permite o desmonte mecânico, ou seja, pelas máquinas de escavação, não sendo necessário o uso de explosivos. Nos outros casos, as atividades na operação de mina se iniciam com perfuração e desmonte, que visa a fragmentação e o afrouxamento do material. Sendo assim, para o projeto de desmonte é montado o plano de fogo, que considera todos os fatores necessários para sua execução: diâmetro do furo, altura da bancada, malha de furos, razão de carga, tipo de explosivo e acessórios, inclinação do furo, subfuração e tampão. Para realizar o desmonte é feito uma preparação do solo no local e os furos para alocar os explosivos e acessórios numa geometria adequada (BOTELHO, 2014; RACIA; PERONI, 2017).

Quando o desmonte acontece, dois tipos de energia são gerados na explosão: a energia do choque e do gás. A primeira é gerada pela pressão no momento da detonação e é transmitida para a rocha através do contato da coluna de explosivo. A energia do choque é responsável pela quebra do maciço e fissuras próximas ao furo, porém a maior parte da energia é desperdiçada em forma de deslocamento de ar. A segunda, a energia do gás causa a maior fragmentação, gerada pela expansão dos gases, ela gera alta pressão nas paredes do furo que se fratura em várias direções aumentando as fraturas geradas pela onda de choque (BOTELHO, 2014).

As etapas de perfuração e desmonte impactam nas etapas de carregamento e transporte. O material desmontado deve apresentar uma distribuição granulométrica uniforme, não tendo excesso de material fino ou grosseiro. Logo, facilita o carregamento com alto enchimento da

concha da escavadeira ou carregadeira e da caçamba do caminhão. Segundo Beyglou (2016), os resultados da fragmentação causada pelo desmonte são vistos inicialmente no carregamento, assim não importa qual o tipo de equipamento utilizado, a fragmentação exerce importante papel no desempenho e na eficiência do carregamento. É necessário um plano de fogo bem definido que atenda aos requisitos das operações de lavra e possibilite alta produtividade dos equipamentos de produção, sempre atualizado com o plano de lavra.

O desmonte quando bem executado aumenta a produtividade e reduz custos das etapas subsequentes. Ter um plano de fogo bem dimensionado apresenta as seguintes vantagens: maior rapidez nos serviços de desmonte; maior produção diária; maior produtividade dos equipamentos de perfuração, carregamento e transporte; mais segurança; maior seletividade; e maior economia (RICARDO; CATALANI, 2007).

2.1.3 Carregamento e transporte

As operações de carregamento e transporte envolvem a retirada e transferência do material das frentes de lavra até os variados pontos de destino, sendo os mais comuns depósitos de estéril e minério, pilhas intermediárias e britadores (QUEVEDO, 2009). Essas duas etapas representam o maior custo dentro da lavra, cerca de 50% e estão diretamente ligadas com o maquinário utilizado (UPADHYAY *et al*., 2020).

De acordo com o planejamento de lavra, a demanda de produção e as características da mina define o porte e o tipo dos equipamentos (NEWMAN *et al*., 2010). Conforme Fisonga e Mutambo (2017) a definição dos equipamentos deve ser feita de modo que o custo de movimentação de material na mina seja o menor, não deixando de levar em consideração a seletividade e diluição do minério, assim como atender as demandas de produção de minério e estéril. Os equipamentos mais usados para o carregamento e transporte são escavadeiras ou carregadeiras e caminhões, respectivamente. Essa combinação tem várias vantagens quando comparada à outras, dentre elas, maior mobilidade, capacidade de escala e tempos de ciclo curtos (CHANDA; HARDY, 2011; MONIRI-MORAD *et al*., 2019).

Os caminhões são utilizados para pequenas e médias distâncias de transporte em virtude das velocidades relativamente elevadas que podem atingir, permitindo obter elevadas capacidades produtivas a baixos custos. A medida em que as distancias ficam maiores, o

transporte continuo deve ser avaliado. Os caminhões mais utilizados são os basculantes comuns, os caminhões articulados e os caminhões fora de estrada ou "*off-roads*". O uso de caminhões de grande porte aumentou significativamente nas últimas décadas, pois fazem o mesmo volume de produção com um menor número de equipamentos (ALMEIDA; NEVES; FIGUEIREDO, 2018; MONIRI-MORAD *et al*., 2019; OZDEMIR; KUMRAL, 2019).

O ciclo produtivo do transporte se inicia com a alocação dos caminhões nas frentes de lavra de minério e/ou estéril, sempre atentando para garantir a alimentação do britador e a operação contínua da usina de tratamento de minério (QUEVEDO, 2009). A alocação de caminhões desempenha um papel significativo na eficiência e produtividade da frota. Na verdade, uma determinação imprecisa do número necessário de caminhões impacta os resultados da operação de transporte e carregamento, causando tempos ociosos da escavadeira, tempos de espera do caminhão, filas nas escavadeiras, assim como no britador e deposito de estéril com área restrita (MONIRI-MORAD *et al*., 2019).

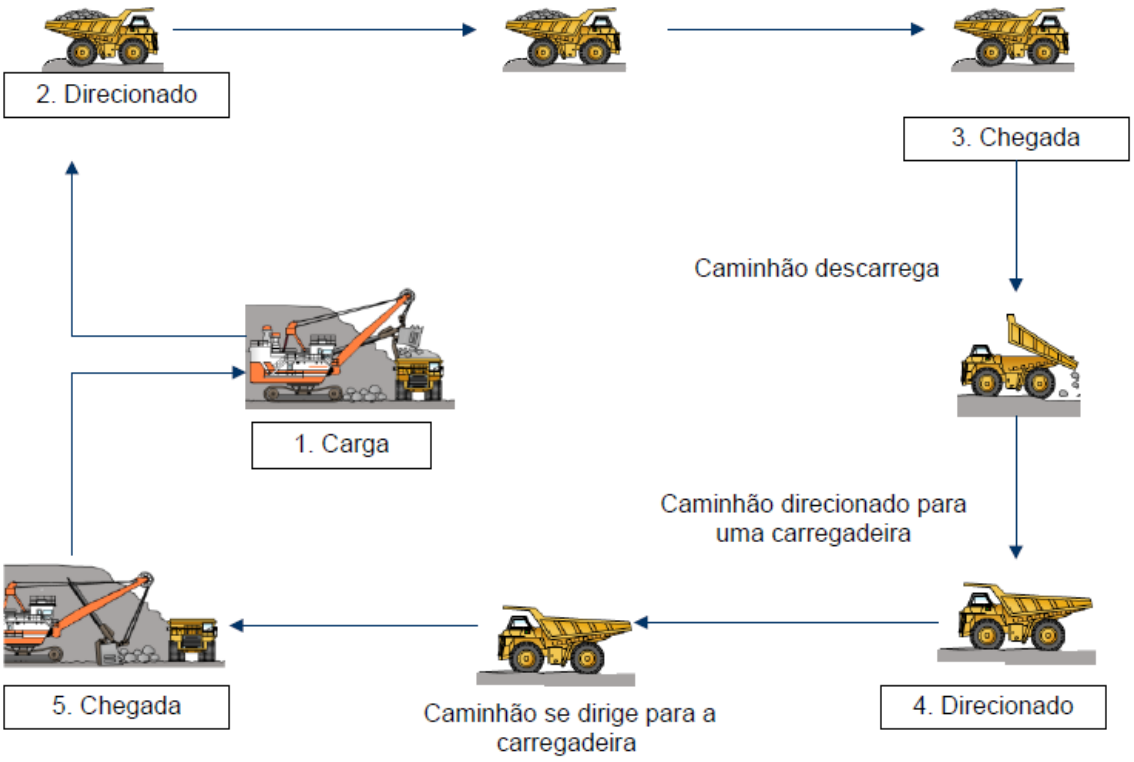
Um dos fatores essenciais para maximizar a produtividade e reduzir o custo da lavra e manutenção de equipamentos é a compatibilidade dos mesmos (PASCH; ULUDAG, 2018). A importância dessa seleção de equipamentos é ressaltada por Coutinho (2017) e Curi (2017), o ideal é que os equipamentos sejam do mesmo modelo, ou seja, caminhões e escavadeiras de mesmo porte ou similar. Quando os equipamentos são iguais, se tem as vantagens de troca de equipamentos por manutenção, assim equipamentos que estiverem mais próximos podem entrar em operação rapidamente, sem a necessidade de parar a frente de serviço ou mesmo de ter que esperar um deslocamento maior de uma máquina que está em uma frente distante. Outra vantagem é com relação aos operadores, esses têm maior flexibilidade uma vez que podem operar todos os equipamentos por serem do mesmo modelo, o que permite maior agilidade nas estratégias diárias.

Em algumas minas o mais interessante pode ser o uso de uma frota híbrida, conceito apresentado por Rodovalho *et al*. (2016), que significa uso de caminhões e escavadeiras de dois ou mais portes diferentes, possibilitando diferentes combinações. Frotas distintas são utilizadas quando as caraterísticas da mina se apresentarem diferentes a ponto de uma frota homogênea não performar bem em todas as frentes da mina. Uma estratégia comum é ter portes de

equipamento maiores para o estéril para ganhar produtividade e baixar o custo, e a operação de minério ser com equipamentos de menor porte devido a seletividade e diluição.

Ainda falando da produtividade da operação unitária de transporte, um ciclo eficiente garante um bom desempenho. O ciclo desses equipamentos consiste de os caminhões carregados transportarem o material até o ponto de descarga e, em seguida, voltar para uma frente de lavra disponível, onde carregam e repetem o ciclo. O tempo total de ciclo do transporte é apresentado na Figura 2, de acordo com Krause (2006) se divide nos seguintes tempos: manobra do caminhão para se posicionar ao lado do equipamento de carga; tempo para a escavadeira encher a caçamba do caminhão com material; deslocamento cheio para o ponto de destino; manobra de descarga; báscula; deslocamento vazio para o ponto de carga; e o tempo que o caminhão fica em fila quando há outro equipamento sendo carregado. Os deslocamentos cheios e vazios são diretamente influenciados pela velocidade e a distância média de transporte. Pash (2018) menciona outro atraso operacional que comumente é ignorado, o tempo que a máquina de carga aguarda a chegada de caminhão.

Figura 2 – Ciclo de Transporte.



Fonte: QUEVEDO (2009, p.54)

Os equipamentos de transporte são produtivos quando estão operando carregados, portanto os tempos em fila e ociosidade dos equipamentos podem ser a maior fonte de não produtividade. Para que este fato não ocorra, é necessário que se tenha um dimensionamento de frota dos caminhões e escavadeiras para que a combinação das duas frotas tenha um balanço ideal entre fila e ociosidade (PASCH; ULUDAG, 2018).

2.2 Infraestrutura de mina

Em adição às operações produtivas, existem as operações auxiliares para garantir que o processo de lavra seja executado conforme o projeto. Entre elas: preparação e manutenção de frentes de lavra, estradas e depósitos são atividades rotineiras que garantem a continuidade da lavra de forma produtiva. Os equipamentos mais usados são tratores, motoniveladoras, escavadeiras, pá carregadeiras, retro escavadeiras, caminhões basculantes, comboios e pipas. Serviços de manutenção de equipamentos de mina e suporte são necessários para assegurar disponibilidade física dos recursos (RACIA; PERONI, 2017; THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019).

2.2.1 Acessos de mina

Os acessos ou estradas de mina são fundamentais para garantir o sucesso da atividade mineradora, são os viabilizadores da etapa de transporte. As vias devem ser aderentes ao projeto geométrico e estrutural elaborado para a mina (BRANDÃO; TOMI, 2011). Os acessos de uma lavra são fundamentais para a garantia da produtividade e segurança. A manutenção deles é fundamental e deve ser realizado com objetivo de proporcionar diminuição de gastos com consumo de pneus e combustível e, sobretudo, manter a segurança do operador (AMARAL; PINTO, 2009; KANSAKE; FRIMPONG, 2020). É preciso observar e estabelecer os critérios e normas dispostas em projeto que visam a interação entre equipamentos, veículos e pessoas. Tudo isso deve ser estabelecido de modo que se tenham regras claras e definidas que garantam a segurança no tráfego dentro da mina (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013; YARDIMCI; KARPUZ, 2019).

Baek e Choi (2017) mencionam a existência de diretrizes para descrever o projeto das estradas, definindo largura, inclinação e curvatura, bem como os procedimentos de construção e manutenção de estradas. No Brasil, a Norma Regulamentadora NR-22, que trata de Segurança

e Saúde Ocupacional na Mineração, estabelece uma série de diretrizes para circulação e transporte de materiais e pessoas. Toda mina deve ter um plano de trânsito definindo regras de tráfego, distâncias mínimas de seguimento, velocidades máximas. Os acessos devem ser sinalizados, possuir uma largura mínima relacionada às larguras dos maiores veículos utilizados e nas bordas das estradas devem ser construídas leiras de segurança e canaletas de drenagem. Os equipamentos de transporte sobre pneus devem apresentar bom estado de conservação e funcionamento, buzina, faróis, alerta de ré, retrovisores, sinal para indicação de mudança de sentido e possuir dispositivos de bloqueio impedindo seu acionamento por indivíduos sem autorização (BRASIL, 2016).

A mina deve atender tanto aos aspectos geométricos (possuir pistas em condições adequadas apresentando valores de largura, inclinação, abaulamento e curvatura aderentes ao projeto) quanto aos aspectos geotécnicos (as pistas devem apresentar boas condições estruturais) (THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019). As camadas que geralmente constituem o pavimento são classificadas como revestimento, base, sub-base e sub-leito, sendo as três últimas de caráter estrutural. A constituição da pista resulta em sua resistência ao rolamento e a condição de segurança que essa propicia à operação (RODOVALHO, 2013; THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019). O ideal ao se pensar em custos é que os materiais usados nessas camadas estejam disponíveis dentro da própria mina (THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019).

2.2.2 Projeto dos acessos de mina

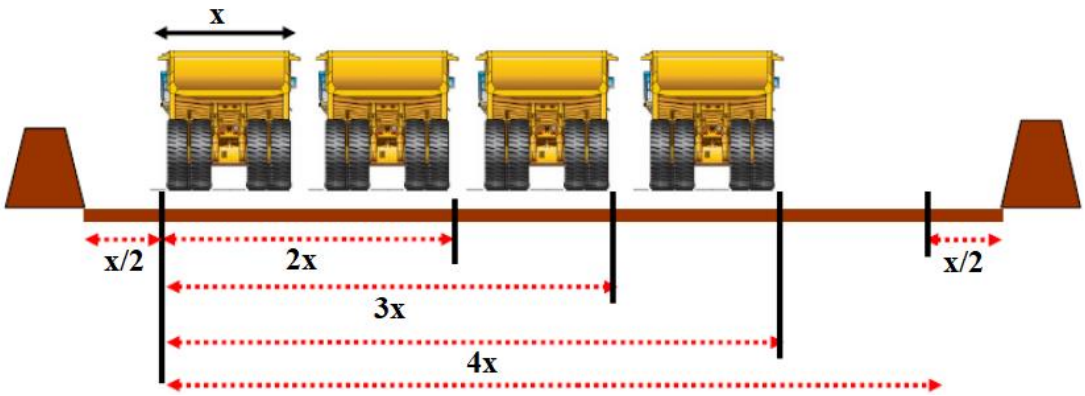
Os projetos geométricos de acessos de mina abrangem as larguras mínimas das vias, formato de leiras de segurança, inclinações transversais e longitudinais das vias, canaletas de drenagem, raios de curvatura e superelevação de curvas.

2.2.2.1 Largura

A NR-22 determina que a largura mínima para vias com pista simples deve ser duas vezes maior que a largura do maior equipamento que transita neste acesso, para vias de pista dupla essa largura deve ser três vezes maior que a largura do maior equipamento. Para curvas recomenda-se uma largura maior, cerca de quatro vezes a largura do maior veículo. Além da largura dos acessos, deve-se manter cerca de metade da largura do caminhão entre a pista e a

leira, conforme mostrado na Figura 3, onde a largura do caminhão é representado por x. Em casos que não seja possível manter as larguras mínimas, devem ser adotadas medidas extras de sinalização para garantir a segurança do tráfego (BRASIL, 2016; COUTINHO, 2017).

Figura 3 – Largura de acessos.



Fonte: Adaptado de COUTINHO (2017, p.31).

2.2.2.2 Leiras de segurança

Nas laterais das bancadas ou estradas onde há riscos de quedas de veículos faz-se necessária à construção de leiras com altura mínima correspondente à metade do diâmetro do maior pneu de veículo que trafega pela via, Figura 4. Leiras baixas não cumprem seu papel de barreira física e leiras muito altas restringem a visibilidade do condutor. Em caso de utilização de leiras em trevos e interseções de acessos, um acabamento nas bordas com rebaixamento se faz necessário para que se tenha melhor visibilidade (BRASIL, 2016).

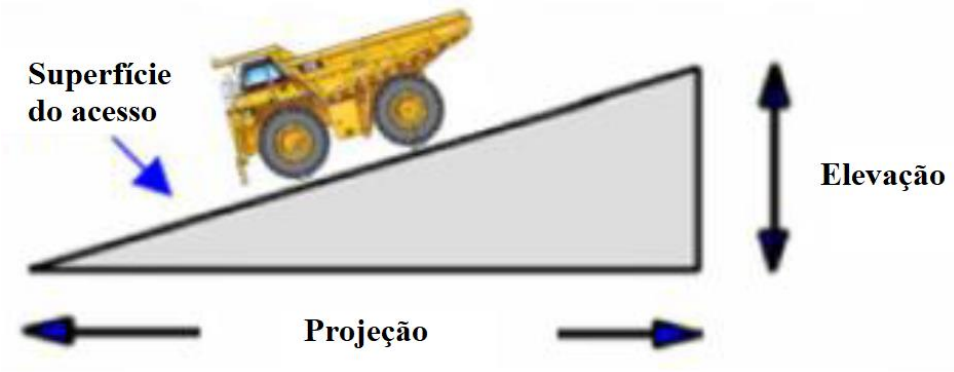
Figura 4 – Altura da leira de segurança.

Fonte: COUTINHO (2017, p.31).

2.2.2.3 Gradiente

A inclinação longitudinal também é conhecida como gradiente, expresso em percentual é a relação entre a distância vertical e a distância horizontal, elevação e projeção, respectivamente, Figura 5 e Equação 1 (COUTINHO, 2017). O gradiente deve ser balanceado, não sendo muito grande, que apesar de menores distância gera perda de velocidade e maior tempo de ciclo; e nem muito baixo pois aumenta a distância média de transporte resultando em alto tempo ciclo. O gradiente ideal para uma rampa está entre 7% e 11%, porém o gradiente ótimo deve ser analisado para cada caminhão e cada mina (THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019).

Figura 5 – Gradiente.

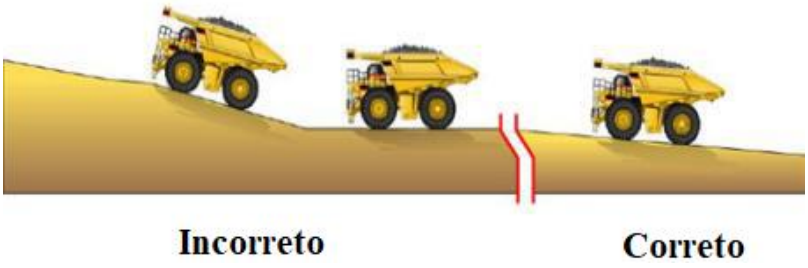


Fonte: COUTINHO (2017, p.32).

Gradiente = (Elevação / Projeção) x 100% (Equação 1)

O gradiente deve ser constante ao longo da rampa e não uma combinação de várias inclinações, Figura 6. Quando a rampa apresenta vários grades exige várias trocas de cambio quando o caminhão sobe, o que gera perda de velocidade, e aumento o uso do freio quando o caminhão desce, resultando em maior custo de manutenção (THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019).

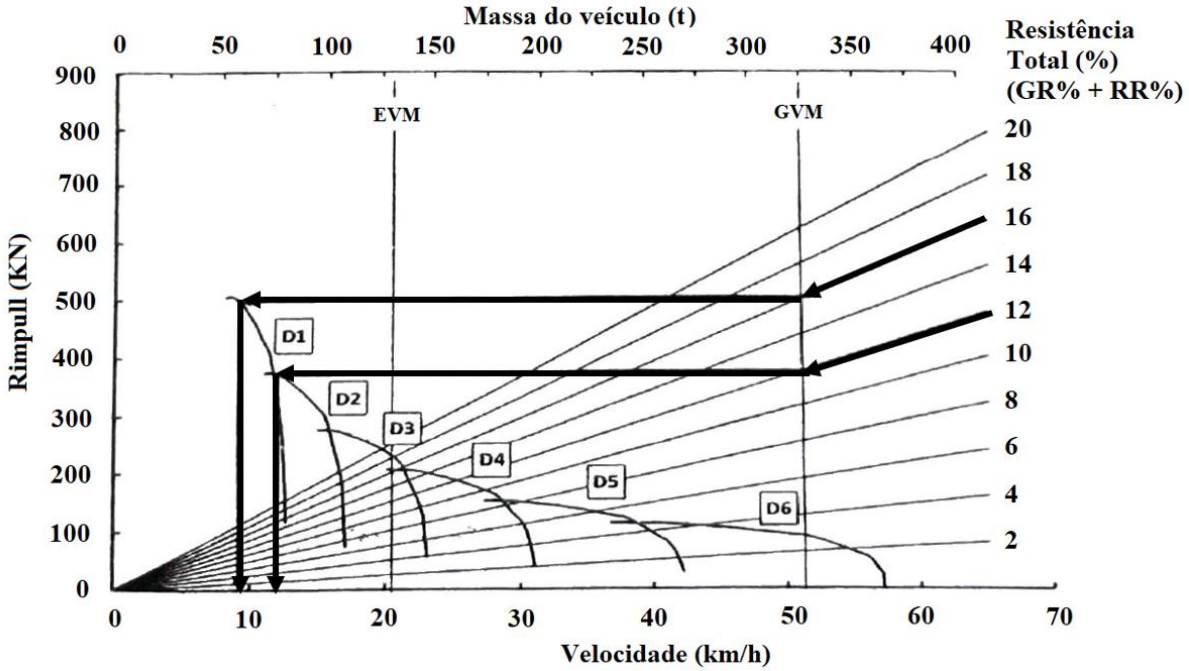
Figura 6 – Gradiente em rampas.



Fonte: COUTINHO (2017, p.33).

Quanto maior o gradiente de uma rampa, menor é a velocidade que um caminhão consegue atingir ao subir por esse trecho. Thompson, Peroni e Visser (2019) apresentam a curva de *rimpull*, Figura 7, que relaciona a resistência total da pista, somatória da resistência ao rolamento e o gradiente da rampa, com a massa total do equipamento e fornece as velocidades que os caminhões conseguem atingir. Na Figura 7, EVM (*empty vehicle mass*) = massa do veículo vazio e GVM (*gross vehicle mass*) = massa do veículo carregado.

Figura 7 – Curva de *rimpull* para caminhões de 200 t.



Fonte: THOMPSON; PERONI; VISSER (2019, p.46).

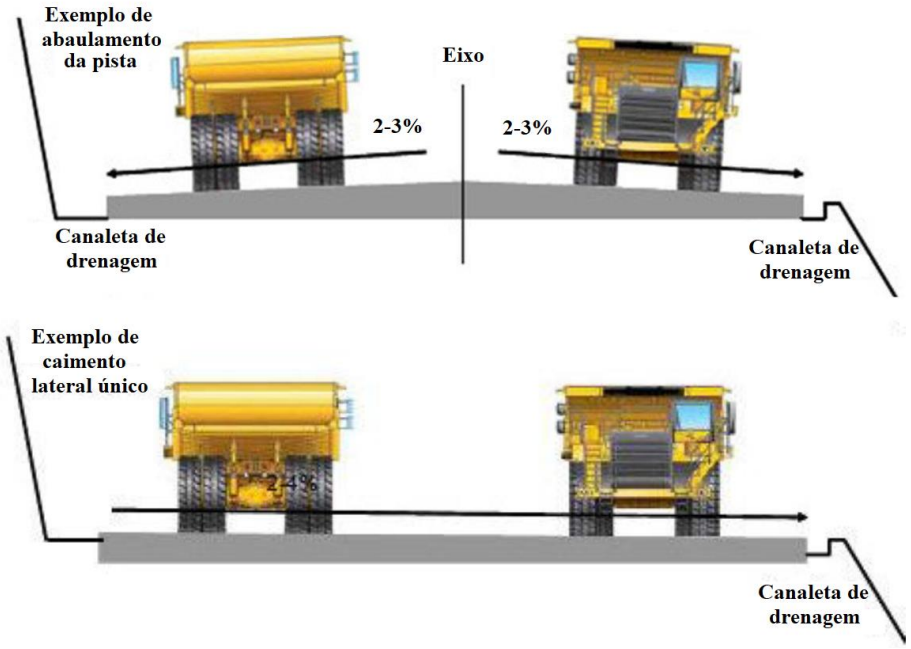
Analisando a Figura 7, observa-se que, por exemplo, um caminhão carregado que sobe uma rampa com resistência total de 16% (gradiente = 13% e resistência ao rolamento = 3%), sobe de 1ª marcha e consegue atingir uma velocidade máxima pouco menor que 10 km/h. Para o mesmo caminhão, considerando uma resistência total da rampa de 12%, a velocidade que o veículo consegue atingir sobe para cerca de 12 km/h.

2.2.2.4 Inclinação transversal

O período chuvoso pode impactar bastante na operação de transporte, é preciso um sistema de drenagem nas estradas cuja finalidade consiste no direcionamento da água para fora da estrada e na redução dos impactos proporcionados pelas chuvas. Os acessos devem apresentar inclinação transversal e longitudinal, mesmo em trechos planos, para que não seja acumulada água nos acessos (REIS, 2014; THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019).

A inclinação transversal, também conhecido como abaulamento, pode ser feita de duas formas, do centro para as duas extremidades ou de uma extremidade para outra. A definição do tipo de abaulamento depende das características de cada local. Um parâmetro importante é o uso das canaletas de drenagem, que direcionam as águas longitudinalmente quando essas atingem a extremidade da pista. A Figura 8 mostra os dois tipos (COUTINHO, 2017).

Figura 8 – Abaulamento de pistas.



Fonte: COUTINHO (2017, p.34).

2.2.3 Tipos de defeitos em acessos

O transporte frequente e as intempéries da natureza podem influenciar o tráfego nos acessos da mina, pois, estes aceleram a ação de degradação da superfície das estradas, principalmente quando não existem técnicas de manutenção adequadas. Os defeitos são as alterações que ocorrem nas vias que podem influenciar de maneira negativa nas condições de uso, reduzindo o desempenho operacional de transporte (CURI, 2017). Os principais defeitos que impactam o desempenho dos caminhões são a alta resistência ao rolamento, poeira, material solto, corrugação, buracos, trilhas de roda, drenagem insuficiente, trincas e fissuras (FERREIRA, 2007; THOMPSON, R. J.; VISSER, 2000). Outro problema é definido pelo termo "borrachudo", que devido a característica do material, uma área da pista se comprime na passagem do caminhão e se dilata logo em seguida com um comportamento semelhante a uma borracha (PINTO, 2006).

Os buracos na pista também denominados de panelas, Figura 9, se dão pela expulsão contínua de material particulado sólido, causado pelo tráfego de equipamentos pesados em trechos onde não existe um eficiente sistema de drenagem. Sua correção se dá através de enchimento dos buracos como medida paliativa e melhoria da drenagem como medida preventiva (COUTINHO, 2017; THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019).

Figura 9 – Buracos na pista.

Fonte: COUTINHO (2017, p.36).

Blocos ou matacões soltos na pista são devidos à queda de material da caçamba dos caminhões quando eles são carregados nas praças ou no deslocamento em rampas ascendentes. A correção é a retirada do material solto, checagem de trechos com inclinação elevada para evitar novos derramamentos e verificar se no carregamento os equipamentos de carga estão colocando corretamente as cargas nas caçambas, de forma centralizada (COUTINHO, 2017; THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019).

A poeira é a suspensão de uma nuvem de material fino desprendido da estrada, é causada pelo trânsito contínuo de veículos na operação de transporte e pode comprometer a segurança devido ao seu impacto na visibilidade dos operadores, Figura 10. A poeira é considerada um defeito de acesso e é mais comum nas estradas de solo argiloso. As práticas mais comuns para redução de poeira são umidificação das vias, aplicação de uma camada fina de material como revestimento, uso de produtos químicos e polímeros, redução da velocidade dos veículos e até mesmo mudando o sistema de escape do veículo para a parte superior do equipamento (COUTINHO, 2017; FERREIRA, 2007; THOMPSON, R. J.; VISSER, 2007).

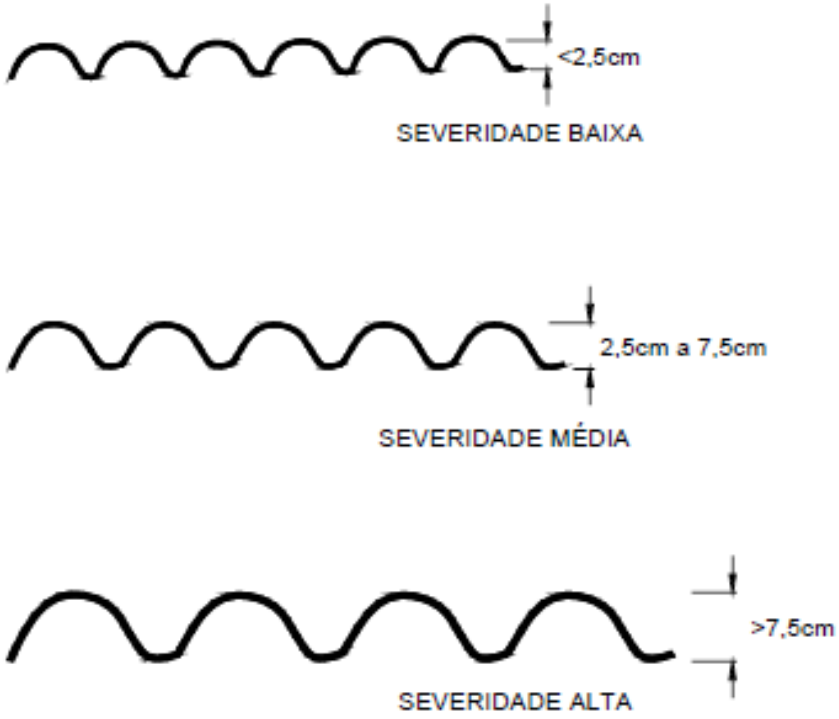
Figura 10 – Poeira.

Fonte: THOMPSON; VISSER (2007, p.442).

As corrugações, também chamadas de costeletas são deformações que aparecem nas pistas de rolamento posicionadas perpendiculares ao sentido do fluxo de veículos. São causadas por diferentes fatores combinados a grandes períodos de seca: vibração do trânsito; baixo suporte do material do subleito; perda de material fino do revestimento da estrada; inclinação transversal insuficiente; e revestimento de baixa qualidade. A solução para as corrugações é o

uso de um material de revestimento que tenha um balanço com uma fração plástica que possibilite aglutinação entre as partículas e os grãos da camada (FERREIRA, 2007). Existem três níveis de severidade para esse tipo de defeito, Figura 11.

Figura 11 – Níveis de severidade de corrugação.

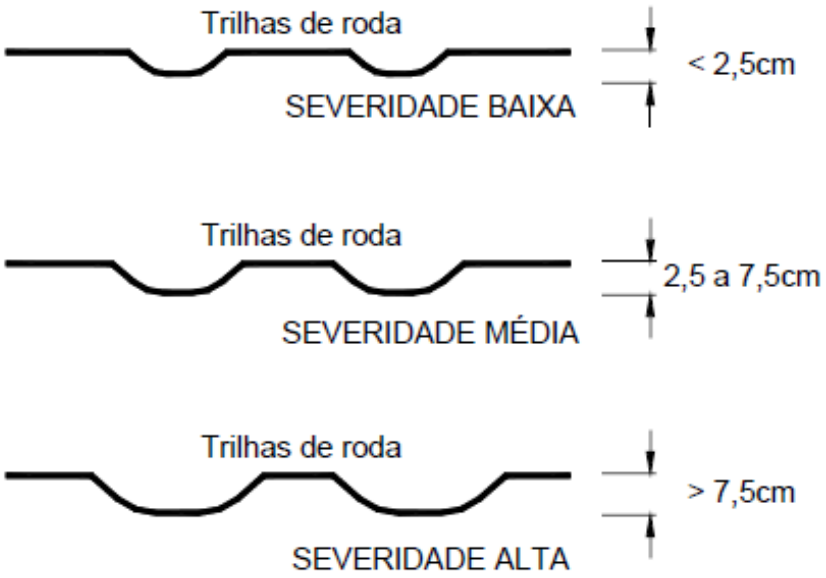


Fonte: FERREIRA (2007, p.33).

Na severidade baixa a profundidade das corrugações é inferior a 2,5 cm ou menos de 10% da área total da estrada apresenta o defeito. Na severidade média a profundidade das corrugações está entre 2,5 e 7,5 cm ou menos de 30% da área total da estrada é coberta pelas corrugações. No nível alto, a profundidade é superior a 7,5 cm e a área coberta pelo problema excede 30% da estrada (FERREIRA, 2007).

Outro defeito característico de acessos é conhecido como as trilhas de roda, que é a formação de depressões longitudinais ao eixo da via. São deformações permanentes do subleito ou do revestimento causadas pelo trânsito dos veículos. A solução varia conforme a severidade, Figura 12, podendo ser uma simples passagem de uma motoniveladora ou serviços mais detalhados, como ajuste de drenagem, substituição do material das camadas e compactação (FERREIRA, 2007).

Figura 12 – Níveis de severidade de trilhas de roda.



Fonte: FERREIRA (2007, p.36).

Na severidade baixa a profundidade dos sulcos é inferior a 2,5 cm ou menos de 10% da área total da estrada apresenta o defeito. Na severidade média a profundidade dos sulcos está entre 2,5 e 7,5 cm ou menos de 30% da área total da estrada é coberta pelas corrugações. No nível alto, a profundidade é superior a 7,5 cm e a área coberta pelo problema excede 10% da estrada (FERREIRA, 2007).

A manutenção de acessos de mina é uma atividade essencial que deve ser realizada com objetivo de proporcionar maior segurança no tráfego de caminhões e menor custo com consumo de pneus e combustível (RODOVALHO, 2013). Diante disto, fazem se necessários equipamentos que possam auxiliar e também uma equipe de infraestrutura capacitada para fazer a manutenção e correção frequente e rotineira dos defeitos nos acessos durante as operações. A Tabela I apresenta os tipos de manutenção, as atividades relacionadas e os efeitos de cada uma (THOMPSON, R. J.; VISSER, 2003).

Tabela I – Categorias de manutenção e atividades para estradas de transporte de minas.

Tipo	Atividade	Efeito
Manutenção de rotina	Preenchimentos pontuais	Preencher buracos e pequenas depressões, reduzir a resistência o rolamento, expulsar a água.
	Drenagem e manutenção das cristas dos taludes	Reduzir erosões e perda de material, melhorar drenagem nas laterais das estradas.
	Espalhamento do material	Redistribuir o material da superfície.
	Nivelamento raso	Redistribuir o material da superfície, preenchimento de depressões menores.
	Controle de poeira e umidificação	Reduzir perda de aglutinante e emissão de poeira.
Reforma	Reaplicação total do revestimento	Restaurar espessura da camada de revestimento.
	Nivelamento profundo	Reperfilar a estrada e reduzir resistência ao rolamento. Blendar material do revestimento.
Reabilitação	Escarificar a estrada, aplicar e compactar material	Melhorar, fortalecer ou recuperar o pavimento.
Melhoramento	Reabilitação e melhoria geométrica	Melhorar alinhamento geométrico e resistência estrutural.

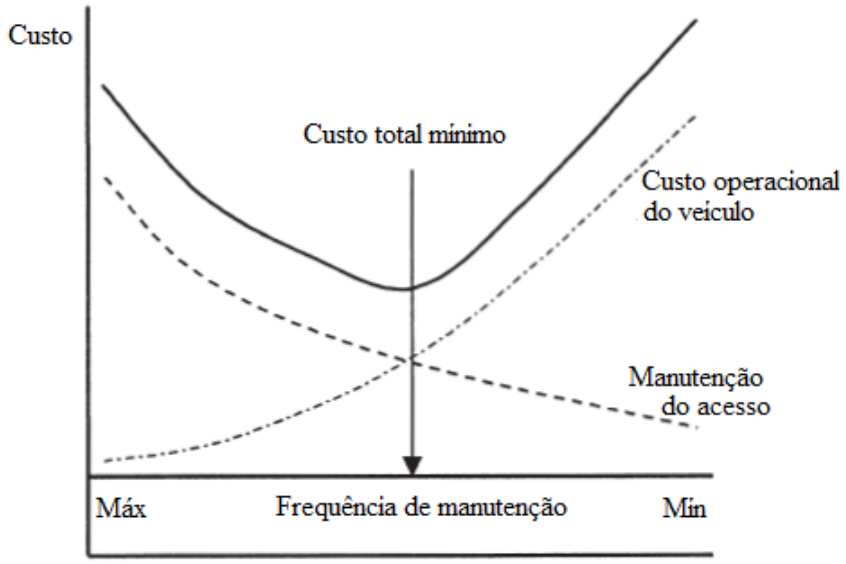
Fonte: Adaptado de THOMPSON e VISSER (2003, p.305).

2.2.4 Avaliação e manutenção de acessos

Ferreira (2007) afirma que o projeto, planejamento e dimensionamento da infraestrutura e manutenção de acessos poderiam ser mais utilizados na mineração pelos benefícios gerados em melhor condição operacional das estradas durante o uso, porém não é amplamente praticado. Conforme Thompson e Visser (2003), historicamente o projeto e manutenção das estradas em minas são realizados fortemente baseados na experiência local afetando o desempenho dos caminhões resultando em altos custos. Apesar de ser um desafio para muitas minas, o uso de uma estratégia de manutenção bem definida possibilita redução significativa de despesas da operação de transporte, estes são definidos basicamente por dois elementos, custos de manutenção de via e de operação dos equipamentos. Ambos estão ligados às condições das

estradas, sua relação pode ser vista na Figura 13 (NIEDBALSKI; MAJCHERCZYK, 2018; THOMPSON, R. J.; VISSER, 2003).

Figura 13 – Custo total mínimo e frequência de manutenção necessária.



Fonte: Adaptado de THOMPSON e VISSER (2003, p.304).

Uma frequência de manutenção mínima gera um alto custo operacional de veículos, por outro lado uma frequência de manutenção máxima também representa um valor elevado. É necessário balancear o custo com o tempo de vida do acesso garantindo as condições conforme o projeto, que deve ser feito para que haja viabilidade econômica na aquisição e utilização de equipamentos auxiliares para manutenção dos acessos diante dos benefícios gerados pela redução de custo com pneus e diesel (CORRÊA *et al*., 2016).

2.2.4.1 Avaliação funcional

Os autores Thompson, Peroni e Visser (2019) apresentam como avaliar a necessidade de manutenção dos acessos. Para isso, é feito um trabalho de campo onde se avalia as condições dos acessos, observando-se os defeitos nas vias e a gravidade dos mesmos, Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Gravidade de defeitos em estradas.

DEFEITO	DESCRIÇÃO VISUAL		
	Grau 1	Grau 3	Grau 5
Buracos Borrachudos			
Costelas			
Afundamento de pneus			
Material solto			
Rochas fixas no revestimento			

Fonte: THOMPSON; PERONI; VISSER (2019, p.145).

Figura 15 – Gravidade de defeitos em estradas.

DEFEITO	DESCRIÇÃO VISUAL		
	Grau 1	Grau 3	Grau 5
Poeira			
Rachaduras longitudinais			
Fissuras			
Rachaduras de crocodilo			
Resistência à derrapagem - molhado			
Resistência à derrapagem - seco			

Fonte: THOMPSON; PERONI; VISSER (2019, p.146).

Com o uso da Tabela II define-se a extensão de cada defeito.

Tabela II – Extensão dos defeitos.

Descrição do grau de defeito - resistência ao rolamento	
Extensão	**DESCRIÇÃO (Porcentagem do comprimento da seção da estrada afetada)**
1	Ocorrência isolada, menos de 5% da estrada afetada
2	Ocorrência intermitente, entre 5-15% das estradas afetadas.
3	Ocorrência regular, entre 16-30% das estradas afetadas.
4	Ocorrência frequente, entre 31-60% das estradas afetadas.
5	Ocorrência extensa, mais de 60% da estrada afetada.

Fonte: THOMPSON; VISSER (2006, p.15).

Após avaliação em campo preenche-se as informações de grau e extensão de cada defeito da Tabela III.

Tabela III – Avaliação funcional de acessos.

DEFEITO	GRAU (1-5)	EXTENSÃO (1-5)	NOTA DO DEFEITO
Buracos/Borrachudos			
Costelas			
Afundamento de pneus			
Material solto			
Rochas fixas			
Poeira			
Rachaduras longitudinais			
Fissuras			
Rachaduras de crocodilo			
Resistência à derrapagem molhado			
Resistência à derrapagem seco			
TOTAL NOTA DEFEITOS FUNCIONAIS (DS) **DS = ∑ (Grau x Extensão)**			

Fonte: THOMPSON; PERONI; VISSER (2019, p.149).

Com a Tabela III preenchida encontra-se o valor de DS, esse valor é interpretado de três formas, manutenção não necessária, eminente e necessária. Se o valor de DS é menor que 60, a via está em boa condição, não é necessária manutenção imediata. Quando o valor de DS está entre 60 e 130, a manutenção da via é eminente, mas estrada é trafegável. A manutenção da via é recomendada se o valor de DS for maior que 130, ou se encontrado algum defeito funcional crítico (costelas = 4; material solto = 4; rochas fixas = 5; poeira = 4; resistência à derrapagem molhado = 9; resistência à derrapagem seco = 9) (THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019).

2.2.4.2 Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento é um fator importante para o desempenho dos caminhões, influência no temos do ciclo, consumo de combustível, custo de manutenção e segurança das operações. É definida como uma medida da força necessária para superar o efeito de atrito entre os pneus e a estrada e é comumente representada por um coeficiente de resistência ao rolamento, que pode ser determinado dividindo a resistência ao rolamento pela força normal aplicada a um pneu de caminhão (ADAIR *et al*., 2015; THOMPSON, R. J.; VISSER, 2003; THOMPSON, V.; VISSER, 2006).

Para estimar a resistência ao rolamento de uma via é feito uma análise semelhante a avaliação funcional e preenche-se a Tabela IV para se obter o valor de rugosidade total da via (RDS). Para essa análise é necessário a avaliação do grau e extensão de buracos/borrachudos, costelas, afundamento de pneus, material solto e rochas fixas, pois são os mais impactantes na resistência ao rolamento (THOMPSON, R. J.; PERONI; VISSER, 2019; THOMPSON, V.; VISSER, 2006).

Tabela IV – Avaliação de resistência ao rolamento de acessos.

DEFEITO	**RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO**		
	GRAU (1-5)	EXTENSÃO (1-5)	NOTA DO DEFEITO
Buracos/Borrachudos			
Costelas			
Afundamento de pneus			
Material solto			
Rochas fixas			
RUGOSIDADE TOTAL (RDS) **RDS = ∑ (Grau x Extensão)**			
Verificar gráfico RDS vs RR para estimar resistência ao rolamento			
RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO ESTIMADA (%)			

Fonte: THOMPSON; PERONI; VISSER (2019, p.149).

A atribuição do valor para a extensão do defeito é baseada na tabela II e para o grau é usado como base a Tabela V.

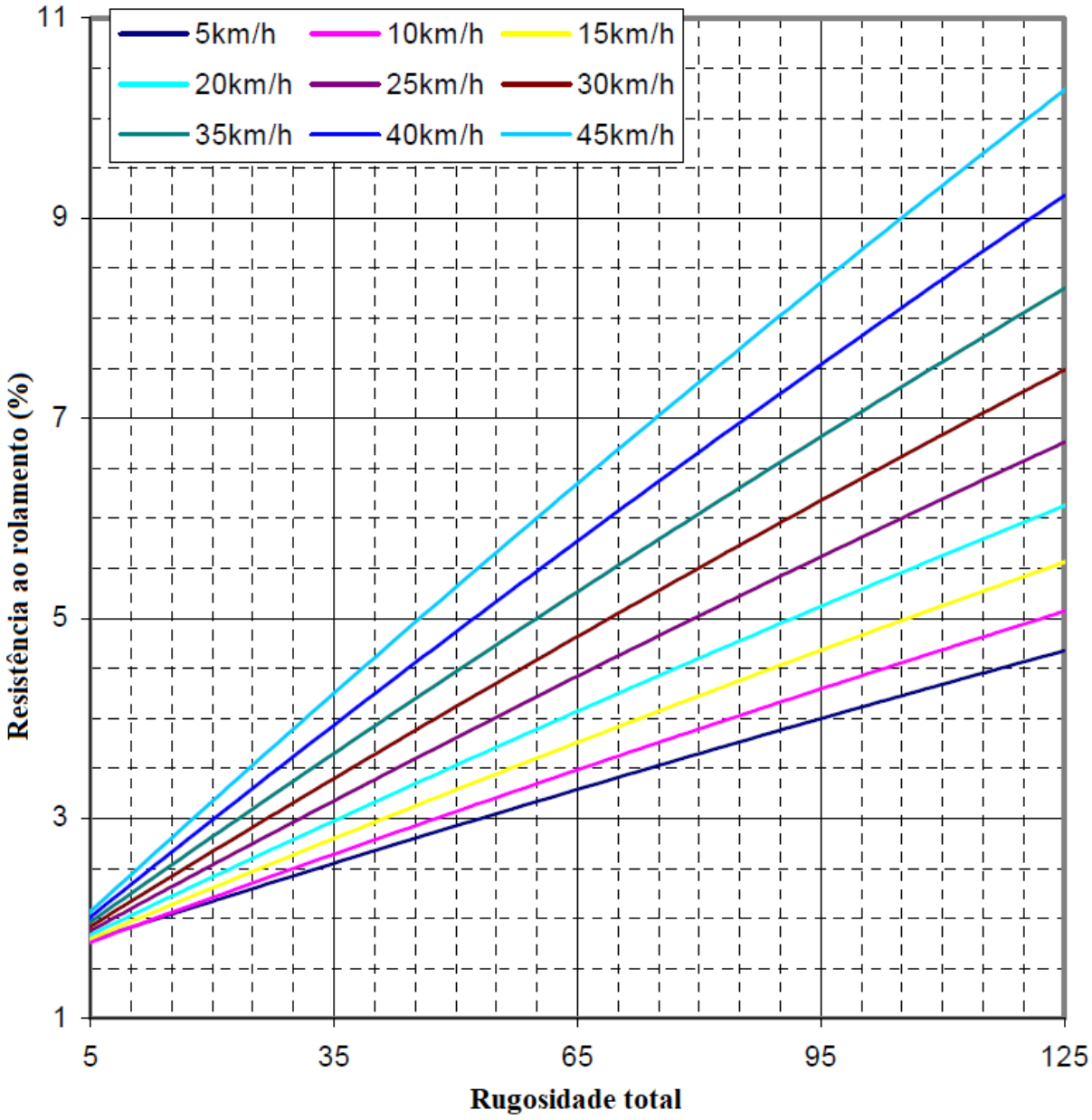
Tabela V – Extensão dos defeitos.

Descrição do grau de defeito - resistência ao rolamento					
Grau	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Buracos Borrachudos	A superfície é marcada por buracos, com diâmetro <50 mm.	Diâmetro de 50-100 mm.	Diâmetro de 100-400 mm e influenciam na qualidade da pilotagem.	Diâmetro de 400-800 mm, influenciam na qualidade de pilotagem e obviamente são evitados pela maioria dos veículos.	Diâmetro> 800 mm, influenciam na qualidade da pilotagem e requerem redução de velocidade ou prevenção total.
Costelas	Ligeira ondulação, difícil de sentir em veículos leves.	Costelas presentes e perceptíveis em veículos leves.	Muito visível e reduz a qualidade de condução visivelmente.	Perceptível no caminhão de transporte e fazendo com que o motorista reduza a velocidade.	Perceptível no caminhão de transporte e fazendo com que o motorista reduza significativamente a velocidade.
Afundamento de pneus	Difícil de discernir sem ajuda, <20 mm.	Apenas perceptível a olho nu, 20-50 mm.	Discernível, 50-80 mm.	Óbvio em veículo em movimento,> 80 mm.	Grave, afeta a estabilidade direcional do veículo.
Material solto	Muito pouco material solto na estrada, <5 mm de profundidade.	Pequena quantidade de material solto na estrada até uma profundidade de 5-10 mm.	Material solto presente na estrada em uma profundidade de 10-20 mm.	Material solto significativo na estrada até uma profundidade de 20-40 mm.	Material solto, profundidade> 40 mm.
Rochas fixas no revestimento	Algumas rochas sobressaindo, mas dificilmente sentidas ou ouvidas ao viajar em um veículo leve.	Rochas sobressaindo sentidas e ouvidas em veículos leves.	Rochas sobressaindo influenciam a qualidade de condução em veículos leves, mas ainda são aceitáveis.	Rochas sobressaindo ocasionalmente requerem ação evasiva de veículos leves.	As rochas sobressaindo exigem uma ação evasiva do caminhão de transporte.

Fonte: THOMPSON; PERONI; VISSER (2019, p.155).

Com o valor do RDS, recorre-se ao gráfico de RDS vs RR para estimar-se o valor da resistência ao rolamento, Figura 16.

Figura 16 – Estimativa de resistência ao rolamento.



Fonte: THOMPSON; VISSER (2006, p.14).

Observando-se o gráfico apresentando na Figura 16 nota-se que para um mesmo valor de rugosidade total (RDS) da pista, uma maior velocidade resulta em uma resistência ao rolamento maior. Assim, para se obter maiores velocidades é necessária uma boa atuação na construção e manutenção das vias.

2.3 Telemetria aplicada na mineração

A industrialização digital contínua e níveis mais altos de automação estão mudando o papel do homem nas indústrias. Novas tecnologias, incluindo o desenvolvimento de sensores avançados e dispositivos de monitoramento, têm permitido a aquisição de informações sobre o desempenho dos diferentes componentes usados em uma mina (KUMAR; DIMITRAKOPOULOS; MAULEN, 2020; RIOS, 2017; ROGERS *et al*., 2019). Nos últimos anos os processos produtivos estão sendo constantemente otimizados, suportado pela eletrônica embarcada, tecnologia da informação e sistemas de comunicação, permitindo a coleta de uma grande quantidade de dados em tempo real e seu uso para tomada de decisões (BAEK; CHOI, 2019; FELSCH-JUNIOR *et al*., 2018).

A palavra telemetria é de origem Grega onde tele significa longe e metria significa medir, teve início com a necessidade de fazer medições em locais sem ou de difícil acesso. Telemetria é a ciência de coletar informações em algum local remoto e transmitir os dados para um local conveniente onde os dados são analisados e registrados (WEBSTER, 2004; MATTOS, 2004).

A telemetria entrou na mineração devido à falta de informações para gestão de indicadores, processos automáticos, e inexistência de controles, à baixa qualidade das estradas e a problemas no funcionamento dos equipamentos de mina por operação fora do padrão do fabricante. Tudo isso pode ocasionar falha antecipada de componentes, o que impacta no seu desempenho e vida útil, prejudicando sua produtividade, qualidade e, principalmente, a segurança dos operadores (FELSCH-JUNIOR *et al*., 2018). Coutinho (2017) atesta que a gestão de parâmetros de ciclo como a velocidade, favorece o aumento de produtividade dos caminhões.

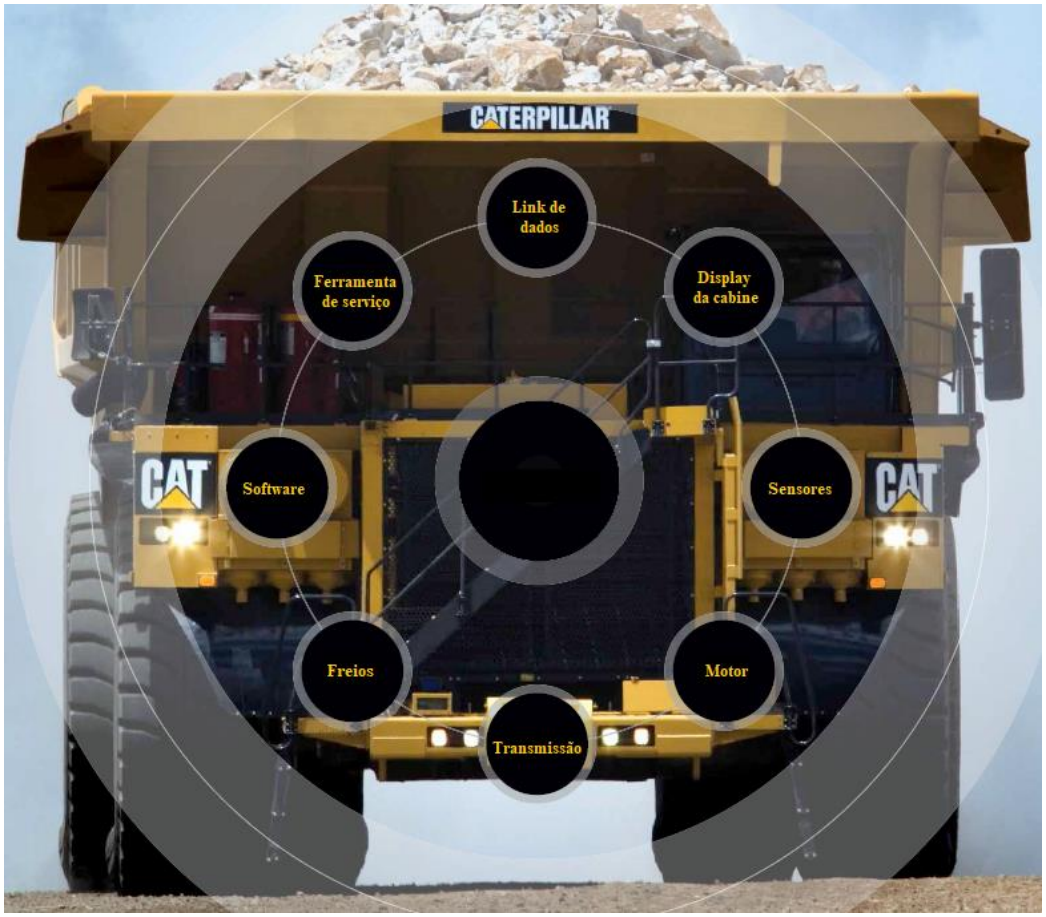
Segundo Fesch Junior *et al*. (2018), a falta de informação pode gerar uma série de problemas na operação da mina e nos equipamentos. Na mina destacam-se: frequência de reabastecimento com baixo volume de óleo diesel; inexistência de controle das condições das estradas; cargas descentralizadas; e falhas na comunicação entre as equipes. Para os equipamentos os problemas abrangem: número elevado de eventos de superaquecimento do sistema de refrigeração dos freios; danos nos chassis e desgaste prematuro dos pneus; excesso de manutenção não programada; falha prematura de cilindros e suspensões; e falhas recorrentes devido à falta de detecção da causa raiz. Com a análise dos dados é possível caracterizar e

detectar comportamento anormal ou anomalias, analisar detecção de erro e impacto no sistema (HASSANIEN; DARWISH; ABDELGHAFAR, 2020).

2.3.1 Caterpillar RAC e VIMS

Para fornecer informações sobre condições dos acessos e do equipamento, possibilitando melhorias de desempenho, segurança e redução dos custos de manutenção, a Caterpillar criou o Controle de Análise de Estrada (RAC – *Road Analysis Control*). O RAC integrado ao Sistema de Gerenciamento de Informações Vitais (VIMS – *Vital Information Management System*) fornece, em tempo real, *feedback* para o operador sobre informações do ciclo, posicionamento, pneus, componentes da suspensão, chassi e trem de força, Figura 17 (CATERPILLAR, 2009, 2020; HOLMAN, 2006).

Figura 17 – Sistema VIMS.



Fonte: Adaptado de CATERPILLAR (2009, p.7).

O sistema VIMS coleta dados dos sensores e Módulos de Controle Eletrônico (ECM – *Electronic Control Module*) dos equipamentos. Esses dados podem ser armazenados para *download* e análise futura, quando usado com um sistema de telemetria, essas informações podem ser transmitidas quase instantaneamente para o escritório da mina possibilitando os gestores e supervisores tomarem decisões. O VIMS ajuda a gerenciar toda a frota, permitindo que cada máquina forneça informações atualizadas sobre seu próprio estado e as condições de trabalho ao seu redor, oferece ferramentas poderosas para gerenciamento de carga útil, avaliação de condições de estradas, produção, planejamento de mina e monitoramento de componentes, aprimorando todo o processo de negócios (CATERPILLAR, 2009, 2020).

Conforme Caterpillar (2020), o uso do RAC gera os seguintes benefícios:

- Manutenção adequada de estradas;
- Tempos de ciclo menores;
- Maior tempo de vida de componentes, sistema de suspensão, estrutura e pneus;
- Menor estresse físico e maior conforto para os operadores;
- Maior segurança operacional;
- Menor consumo de combustível;
- Menores custos operacionais.

2.4 Sistemas de gerenciamento de frota

O principal objetivo do planejamento de produção em uma mina a céu aberto é a determinação de qual ritmo de lavra deve ser implementado em cada frente, atendendo a demanda de alimentação da usina de beneficiamento. As frentes de lavra possuem características e qualidade diferentes, tais como o teor de determinado elemento químico ou a percentagem de minério em determinada granulometria. Cada frente deve contribuir com uma quantidade para que o produto final esteja em conformidade com as exigências da planta de beneficiamento (COSTA; SOUZA; PINTO, 2005).

O primeiro estágio na alocação de caminhões é atender a necessidade de produção. Esse direcionamento é feito apoiado em tempo real por um sistema de despacho, com ou sem a interação do despachante. A existência de muitos elementos operacionais incertos torna a

alocação mais complicada, uma vez que o modelo de alocação é baseado no desempenho histórico e é implementado sem reconhecer explicitamente a incerteza (TA *et al*., 2005).

Quando um caminhão descarrega na britagem ou nos depósitos, ele solicita um novo destino. Este pode ser uma escavadeira na operação de minério ou de estéril. As melhores rotas já foram estabelecidas pelo plano operacional, resta estabelecer o destino. Neste momento, usar os dados atuais sobre o estado do ciclo das escavadeiras e caminhões, transmitidos ao computador pelo sistema de despacho, possibilita um melhor desempenho da frota (ELBROND; SOUMIS, 1987).

A capacidade de produção de cada frente é determinada pelos equipamentos de carga nela alocada e pelos caminhões que realizam o transporte do material até o ponto de basculamento. Com sistemas de despacho, espera-se aumentar a produção com a quantidade de equipamentos disponíveis ou atingir a produção desejada com um menor número de equipamentos (ALARIE; GAMACHE, 2002). Segundo Costa (2005), para que os caminhões sejam alocados de forma correta, seguindo as diversas restrições estabelecidas para o cumprimento das especificações de lavra, as empresas de mineração adotam dois tipos de alocação: estático e dinâmico.

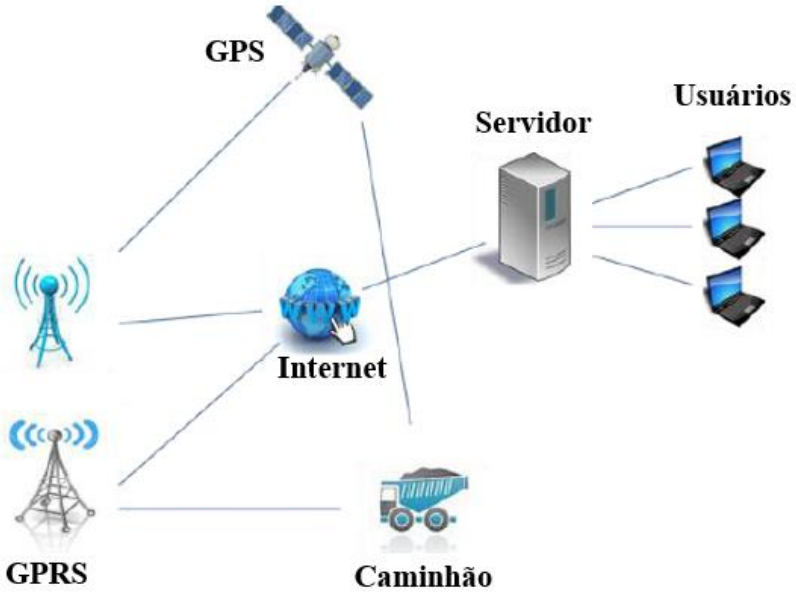
O sistema de alocação fixa ou estática dos caminhões é o método mais usado pelas empresas mineradoras. As rotas de cada máquina são calculadas analisando as especificações da quantidade necessária de movimentação de material e o número de equipamentos disponíveis. Cada caminhão é alocado a uma única rota, ou seja, permanece deslocando-se entre dois pontos fixos, um de carga e outro de descarga. A partir da programação dessas rotas, o técnico ou supervisor comunica a cada motorista para a efetivação do transporte. Caso haja alguma alteração nos pontos de deslocamento ou nas quantidades disponíveis de veículos, o responsável pela coordenação dos caminhões modifica as rotas com base em sua própria experiência (ALARIE; GAMACHE, 2002; RODRIGUES; PINTO, 2012). Cabe ao técnico ou supervisor a decisão de alocação dos caminhões, porém a escolha pode não ser a melhor solução uma vez que são considerados apenas os impactos locais sem uma análise crítica de visão global do ciclo produtivo. O método de alocação estática exige um despachante altamente experiente para garantir uma operação bem sucedida (TA *et al*., 2005).

Na alocação dinâmica o caminhão pode ser direcionado para diferentes locais de carga e de descarga, a alocação é feita buscando minimizar a formação de filas e ociosidade de equipamentos. Esse aumento de produtividade acarreta um ganho de produção ou na redução da quantidade de equipamentos operando, mantendo o mesmo patamar de movimentação (COSTA, 2005; RODRIGUES; PINTO, 2012). Para que o sistema de despacho de caminhões seja completo é importante que o sistema de monitoramento dos equipamentos seja preciso e confiável, de modo que as operações da mina possam ser otimizadas em tempo real. Um sistema de despacho dinâmico reúne um algoritmo de sequenciamento de viagens, um sistema de comunicação entre os equipamentos de carga, caminhões e central de comandos. O algoritmo utilizado permite tomar a melhor decisão no gerenciamento de equipamentos considerando o cenário atual da mina - dados coletados em tempo real e dados de entrada como topografia e configurações previamente definidas pela equipe técnica da mina. O sistema é multidirecional, recebe dados em tempo real e o monitoramento das operações é altamente efetivo (COSTA, 2005; RODRIGUES; PINTO, 2012).

Os sistemas de gerenciamento de frota (FMS – *fleet management system*) são usados para gestão dos equipamentos de mina e otimização das operações mineiras. Os FMS são aplicativos que auxiliam na automação do gerenciamento de caminhões e escavadeiras, permitindo aos supervisores de produção aumentar a produtividade do processo de transporte, maximizando a utilização do equipamento, reduzindo assim os custos de operação. Um computador em cada veículo é o provedor de dados móveis para o FMS (CORONADO, 2014).

Todos os FMS são baseados no rastreamento da posição e *status* dos veículos. Este sistema é geralmente baseado no Sistema de Posicionamento Global (GPS), embora em algumas circunstâncias possa funcionar em uma plataforma de Serviço de Rádio de Pacote Geral (GPRS). O processo é mostrado na Figura 18. Quando o sistema determina a localização, velocidade e curso do veículo, essas informações são transmitidas para um aplicativo de *software*. A transmissão de dados pode ser feita usando uma combinação de sinais de satélite e retransmissores terrestres (CORONADO, 2014).

Figura 18 – Sistema de monitoramento e gestão de frota.



Fonte: CORONADO (2014, p.20).

O FMS é uma ferramenta de gerenciamento de equipamentos de mina que permite analisar indicadores, maximizar a produção e minimizar os gastos operacionais a partir de tomada de decisões utilizando informações em tempo real (CAMPELO; MARIN; TOMI, 2018). Além do fornecimento de dados do ciclo, esses sistemas auxiliam no direcionamento dos caminhões para atender a demanda de produção da forma mais eficiente (TA *et al*., 2005).

2.5 Indicadores de desempenho

A gestão adequada de uma empresa envolve a medição e o entendimento de seu desempenho. Um gestor não é capaz de melhorar o desempenho da empresa se não for capaz de medi-lo. Os indicadores são uma ótima ferramenta para monitorar e melhorar processos, são indicados para medir a eficiência dos processos frente ao planejado. Os indicadores chave de desempenho (KPIs) são as metas mais detalhadas das organizações, que direcionam as atividades dos gestores para torná-las viáveis (CALDEIRA, 2012; CORRAL, 2017; HELMY *et al*., 2020).

É de fundamental importância a medida de desempenho na avaliação da gestão do negócio. Gerir a performance é medi-la para poder entender o passado, o presente e onde se quer chegar no futuro do negócio. Intuição e experiência são importantes, mas medir a

performance com ferramentas adequadas é um dos lemas do princípio gerencial (TONCHIA; QUAGINI, 2010; WEBER; THOMAS, 2005).

Na operação de mina é feito o dimensionamento do plano de produção, neste cálculo são usados indicadores relacionadas as capacidades dos equipamentos de carregamento e transporte. As capacidades dos caminhões e escavadeiras podem ser definidas em termos de toneladas máximas de material que podem ser transportadas ou extraídas em cada período de tempo ou em termos de horas de transporte e escavadeira (ou toneladas por hora) disponíveis para uso. Uma estimativa correta desses indicadores é fundamental para que o realizado tenha aderência ao planejado. Para caminhões e escavadeiras os indicadores mais comuns são a disponibilidade física, a utilização física e a produtividade (BLOM; PEARCE; STUCKEY, 2019; CAMPELO; MARIN; TOMI, 2018).

A disponibilidade física está relacionada às condições mecânicas dos equipamentos, sendo o tempo que eles estão disponíveis para serem operados, Equação 2. A utilização física é o tempo que o equipamento pode ser operado em relação ao tempo disponível, Equação 3. Esta é influenciada por horas ociosas devido ao tempo de refeição, troca de turno, condições climáticas, falta de operador e preparações de frentes de lavra. A produtividade dos equipamentos se resume a movimentação que o equipamento faz por hora, Equação 4 (CAMPELO; MARIN; TOMI, 2018; RACIA; PERONI, 2017).

$$DF = (HP - HM) / HP \quad \text{(Equação 2)}$$

$$UF = HT / (HP - HM) \quad \text{(Equação 3)}$$

$$PH = PD / HT \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

DF = Disponibilidade física (%)

HP = Horas planejadas (horas)

HM = Horas de manutenção (horas)

UF = Utilização física (%)

HT = Horas trabalhadas (horas)

PH = Produtividade (toneladas/hora)

PD = Produção (toneladas)

Para o cálculo da produtividade da frota de transporte devem ser considerados os fatores do ciclo. A Equação 5 apresenta como pode ser calculada a produtividade dos caminhões (CAMPELO; MARIN; TOMI, 2018).

$$PH = \frac{\text{Carga}}{\left(\text{TMC}+\text{TMB}+\text{TFC}+\text{TFB}+\text{TC}+\text{TB}+\left(\frac{\text{DMT}}{\text{Velocidade}}\right)\right)} \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

CM = Carga média (toneladas)

TMC = Tempo de manobra para carregar (horas)

TMB = Tempo de manobra para bascular (horas)

TFC = Tempo de fila para carregar (horas)

TFB = Tempo de fila para bascular (horas)

TC = Tempo de carregamento

TB = Tempo de basculamento (horas)

DMT = Distância média de transporte (quilômetros)

VM = Velocidade média (km/h)

Dentre estas variáveis, as que tem maior influência no indicador são a velocidade média e a DMT (distância média de transporte) (BRANDÃO; TOMI, 2011). A DMT é definida no planejamento de produção sendo a distância entre as frentes de lavras e os pontos de destino. A velocidade média é diretamente influenciada pela qualidade das vias de transporte, vias conforme o projetado resulta em maiores velocidades, e consequentemente maior

produtividade. Os tempos TMC, TMB, TFC, TFB, TC e TB não dependem da DMT, se uma operação se mante constante por um longo período de tempo, esses valores tendem a não ter grandes variações, sendo considerados como tempos “fixos”.

É fundamental ressaltar que a velocidade tem um limite estabelecido, e este varia com as características de cada mina. Esse limite é uma medida de segurança que garante que os equipamentos não transitem em velocidades que podem colocar em risco as pessoas que estão na mina. Cabe a equipe de mina deixar as melhores condições mineiras para que os caminhões trafeguem com velocidades altas, porém dentro do limite de segurança.

2.5 Relatórios e ferramentas de análise de desempenho

Um sistema de gestão de frotas oferece ao gestor uma série de relatórios que possibilitam o entendimento de como está o desempenho de equipamentos e pessoas (RODOVALHO, 2013). Essa ferramenta fornece relatórios claros e objetivos que podem ser facilmente interpretados por meio de gráficos ou planilhas.

A partir dos dados apresentados nos relatórios é possível fazer avaliações diversas, tais como: avaliar o desempenho do motorista, identificar trechos de maior tráfego, direcionar equipamentos e tomar ações para otimizar resultados. Dependendo das necessidades apontadas pelos relatórios de desempenho, a central de rastreamento pode focar na avaliação dos seguintes dados: velocidade; rotas percorridas; quilometragem rodada; paradas. Além do emprego da telemetria possibilitar a gestão da velocidade, ele também potencializa o uso de ferramentas que fornecem maior segurança para a operação, assim, a tecnologia não só mede dados das máquinas como também avalia condições operacionais e comportamento de pessoas (NADER, 2013).

Com a grande quantidade de informação disponível através dos sistemas de gerenciamento de frotas existem diferentes possibilidades de relatórios e ferramentas para análise e gestão de recursos. Cabe a cada mina usar a informação da melhor forma para sua operação.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 Natureza e classificação da pesquisa

Este trabalho com relação a finalidade se classifica como uma pesquisa aplicada, pois envolve estudos e práticas que contribuem para a identificação e solução do problema de aumento de produtividade da frota de caminhões de transporte na operação de uma mina da região do Alto Paranaíba em Minas Gerais. Quanto aos campos da ciência classifica-se como uma pesquisa interdisciplinar uma vez que todas as áreas envolvidas na execução desse projeto se integram e relacionam entre si. Quanto aos objetivos classifica-se como uma pesquisa explicativa pois busca encontrar os fundamentos da produtividade dos caminhões na mina, registrando dados e fatos. Estes são analisados, interpretados, relacionados e identificados suas causas.

Quanto aos procedimentos classifica-se como pesquisa de:

- revisão bibliográfica;
- estudo de caso - investigação do aumento de produtividade dos caminhões exclusiva para a mina;
- ação - uso de uma metodologia de resolução de problema além de uma investigação científica;
- campo – identificação de problemas que afetam a produtividade, criação de planos de ações para solucionar esses problemas e, por fim, analisar as alterações que o projeto trouxe para o ambiente.

Quanto a abordagem classifica-se como uma pesquisa quali-quantitativa, pois é feito um levantamento das principais causas que impactam na produtividade e depois é feito um tratamento em cima de dados levantados. Com relação ao tipo de método empregado neste projeto, é o método hipotético-dedutivo, pois se parte de uma hipótese e busca deduzi-la na verificação dos fatos e fenômenos.

3.2 Procedimentos metodológicos

3.2.1 Definição de uma ferramenta

Foi identificado a necessidade de uma ferramenta que possibilite diariamente a identificação de pontos de baixa velocidade na mina. Através de *brainstorming* com a equipe da operação de mina, concluiu-se que com um mapa de calor de velocidade é possível identificar os trechos da pista com irregularidades e direcionar os recursos de infraestrutura.

A mina conta com um sistema de gerenciamento de frota que fornece vários relatórios que permitem acompanhamento e gestão de diversas informações sobre o ciclo de produção. Dentre os relatórios disponíveis, há o registro de velocidade, que mostra a cada dez segundos a velocidade e a localização do caminhão ao longo do trajeto. Com esse relatório é possível gerar uma nuvem de pontos, a qual pode ser transformada em um mapa de calor de velocidade através do *software* de planejamento de lavra.

3.2.1.1 Levantamento de dados

A operação de transporte na mina é realizada por duas frotas de caminhões com portes diferentes, sendo uma frota da Caterpillar (CR) e outra da Komatsu (KM). O relatório de registro de velocidade, Figura 19, registra em um dia cerca de 150.000 dados das duas frotas.

Figura 19 – Registro de velocidade.

Relatórios Dinâmicos > Registro De Velocidade

Data inicio 26/08/2019 10:00:00

Data fim 26/08/2019 10:20:00

Aplicar Sair

Dados

TAGPREFIXO	TAGNUMERO	DATA	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE	VELOCIDADE
CR	2003	26/08/2019 10:00:00	308908,775423219	7802326,13184411	1299,3	35
CR	2008	26/08/2019 10:00:00	306648,036230112	7799842,80985796	1237,8	35
CR	2009	26/08/2019 10:00:00	307710,360291098	7800169,6726447	1232,9	27
CR	2010	26/08/2019 10:00:00	307200,618335227	7802867,99401705	1211,3	24
CR	2014	26/08/2019 10:00:00	306070,547359335	7801589,1631233	1311,3	7
CR	2026	26/08/2019 10:00:00	306058,836229686	7801536,83157026	1306,7	16

Os dados disponíveis no relatório são mostrados na Tabela VI. Para a execução deste trabalho são selecionadas as colunas: Tag prefixo, latitude, longitude, altitude, velocidade e tipo de ocorrência, destacados na Tabela VI.

Tabela VI – Categorias de manutenção e atividades para estradas de transporte de minas.

COLUNA
Tag Prefixo
Tag Número
Data
Latitude
Longitude
Altitude
Velocidade
Tipo de ocorrência
Operador
Frente
Frente local origem
Frente local destino
Descrição rota

Com as informações selecionadas da Tabela VI é possível separar a frota de caminhões, posição do equipamento da mina, velocidade e se o caminhão está operando cheio ou vazio.

3.2.1.2 Tratamento dos dados

Para deixar os dados prontos para serem importados no *software* de planejamento de mina foi realizado um tratamento dos dados:

a) Filtrar Tag prefixo para CR e KM. No relatório estão informações sobre todos os equipamentos da frota, para o mapa de calor precisa-se apenas dos caminhões.
b) Filtrar tipo de ocorrência para operando cheio e operando vazio. Como o sistema registra o equipamento o tempo todo, para análise das vias foram selecionados apenas os momentos em que o caminhão está deslocando carregado ou descarregado.
c) Desconsiderar dados com velocidades acima de 55 km/h para os caminhões Caterpillar e em 45 km/h para os caminhões Komatsu, uma vez que esses caminhões possuem

velocidades limitadas pelo fornecedor local em 55 e 45 km/h para Caterpillar e Komatsu, respectivamente.

3.2.1.3 Importação dos dados no software de planejamento de mina

Depois das tratativas no banco de dados foi preparado um arquivo para ser importado no *software* de planejamento de mina. São necessários mais dois ajustes:

a) Renomear as colunas de longitude, latitude e altitude para xpt, ypt e zpt, respectivamente.
b) Substituir vírgulas por pontos para as informações das coordenadas.

O relatório gerado no sistema de gerenciamento de frota foi exportado para um arquivo no formato csv (*comma-separated values*). Para dar agilidade ao processo foi criado uma macro, no programa Microsoft Excel para abrir o arquivo em csv, fazer as tratativas e exportá-lo para um arquivo de texto em formato txt.

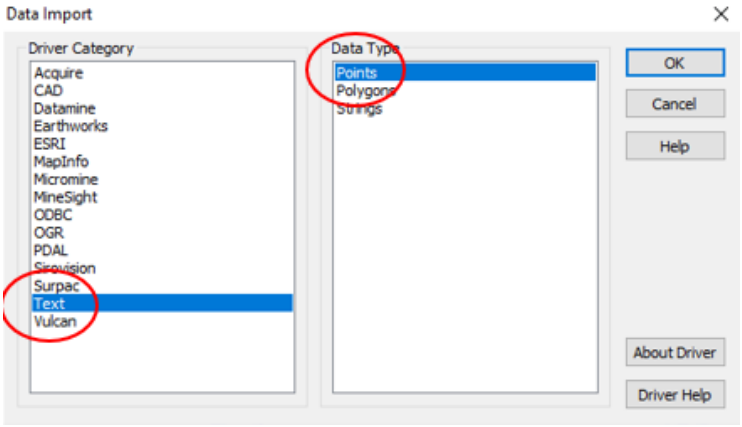
A macro resume e compreende o processo em 3 etapas: exportação do relatório de velocidade, execução da macro e importação no *software* de planejamento. A Figura 20 mostra o arquivo final após toda a preparação feita pela macro.

Figura 20 – Arquivo gerado pela macro.

XPT	YPT	ZPT	TAGP	TAGN	DATA	VEL	OCORR	OPERA	FRENTE	ORIG	DEST
307239.9774	7802922.298	0	CR	2021	03/01/2020	10:33			12	OPERANDO	VAZIO
307196.6298	7802875.435	0	CR	2021	03/01/2020	10:33			27	OPERANDO	VAZIO
307129.4402	7802815.246	0	CR	2021	03/01/2020	10:34			35	OPERANDO	VAZIO
307051.7201	7802740.051	0	CR	2021	03/01/2020	10:34			38	OPERANDO	VAZIO
306974.2107	7802664.803	0	CR	2021	03/01/2020	10:34			36	OPERANDO	VAZIO
306920.7509	7802578.214	0	CR	2021	03/01/2020	10:34			33	OPERANDO	VAZIO
306909.5299	7802459.703	0	CR	2021	03/01/2020	10:34			48	OPERANDO	VAZIO
306901.6689	7802340.487	0	CR	2021	03/01/2020	10:34			45	OPERANDO	VAZIO
306891.3557	7802200.329	0	CR	2021	03/01/2020	10:35			46	OPERANDO	VAZIO
306855.154	7802097.078	0	CR	2021	03/01/2020	10:35			40	OPERANDO	VAZIO
306766.027	7801994.565	0	CR	2021	03/01/2020	10:35			44	OPERANDO	VAZIO
306689.4938	7801901.389	0	CR	2021	03/01/2020	10:35			41	OPERANDO	VAZIO
306638.0048	7801822.659	0	CR	2021	03/01/2020	10:35			39	OPERANDO	VAZIO
306577.1507	7801695.344	0	CR	2021	03/01/2020	10:35			47	OPERANDO	VAZIO
306507.5168	7801579.768	0	CR	2021	03/01/2020	10:36			48	OPERANDO	VAZIO

Dentro do *software* de planejamento esse arquivo foi importado como um arquivo de pontos, Figura 21, e integrado ao mapa topográfico da mina.

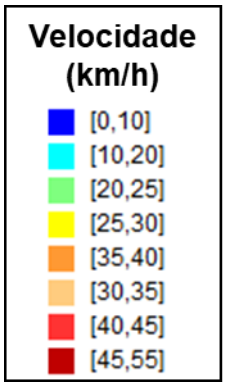
Figura 21 – Importação dos registros de velocidade.



3.2.1.4 Definição de uma legenda

Com a importação dos pontos concluída definiu-se uma legenda para gerar o mapa de calor de velocidade. Os *ranges* de velocidades selecionados são mostrados na Figura 22.

Figura 22 – Legenda do mapa de calor de velocidade.



Definiu-se uma variação de 0 a 10 km/h para o *range* de menor velocidade e depois varia-se de 5 em 5 km/h.

3.2.2 Definição de máxima velocidade por trechos

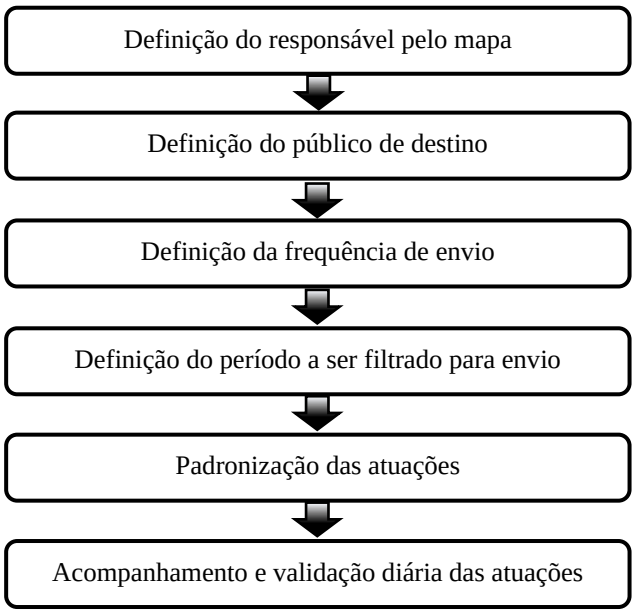
De forma a definir as velocidades máximas estabelecidas pela curva de *rimpull* apresentada na Figura 7 foi necessário a informação da resistência ao rolamento da pista.

A resistência ao rolamento foi estimada utilizando-se as Tabelas II, IV e V. Com avaliação em campo e preenchimento das tabelas, obtêm-se o valor de RDS. Em seguida com o gráfico da Figura 16 foi estimada a resistência ao rolamento.

3.2.3 Padronização e implantação do uso da ferramenta

O passo a passo para a padronização e implantação do uso do mapa de calor de velocidade é mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Padronização e implantação do mapa de velocidade.



3.2.4 Adequações de acessos

Com a rotina de envio e avaliação de campo implementada, se estabelece a forma de manutenção de vias apresentada no tópico 2.2.4 para minimizar ou eliminar os problemas encontrados.

3.2.5 Relatórios para gestão da velocidade média

A gestão da velocidade média é extremamente importante, três fatores impactam diretamente nesse indicador: condição de mina, desempenho do operador e condição do equipamento. Com a implantação do mapa de calor de velocidade é possível fazer um acompanhamento da condição dos acessos da mina. Para ampliar o poder de atuação é preciso acompanhar os outros dois fatores mencionados.

A forma de operar o caminhão tem grande influência em seu desempenho. Apenas a informação do velocímetro não é suficiente para que o operador saiba a velocidade média do

ciclo. Visando levar a informação de velocidade média para os operadores foram desenvolvidas duas ferramentas. A primeira um relatório que mostra dentro do caminhão a velocidade média de cada viagem. A segunda é um relatório de *business intelligence* que mostra a velocidade média de cada equipamento ao longo do turno, que fica exposto em uma TV ao lado de fora do escritório da mina de modo que os operadores possam visualizar seu desempenho durante os tempos de troca de turno, refeição e descanso. Além de ver seu desempenho os operadores também podem ver o desempenho dos demais colegas. Esse relatório também possibilita ao supervisor e técnico identificar operadores e caminhões que estão operando com menor desempenho quando comparado aos outros na mesma condição.

Para proporcionar ao supervisor maior conhecimento do desempenho da equipe e possibilitar um mapeamento para *feedback* e desenvolvimento dos operadores foi criado um relatório em que é mostrado a velocidade média de cada operador. Com esse relatório é possível um mapeamento e desenvolvimento da equipe.

3.2.6 Considerações para análises estatísticas

O desempenho da frota de transporte ao longo do ano é influenciado pela pluviometria, os caminhões apresentam velocidades menores no período de chuva e maiores no período de seca, que acontece de maio a setembro. Entre meses de maio e setembro podem ter dias com ocorrência de chuva, porém em menor intensidade que os demais. A Tabela VII apresenta a pluviometria histórica da mina.

Tabela VII – Média pluviometria histórica 1984 a 2020.

Mês	Pluviometria (mm)
Jan.	313
Fev.	221
Mar.	227
Abr.	98
Mai.	57
Jun.	18
Jul.	11
Ago.	18
Set.	74
Out.	142
Nov.	221
Dez.	298

Para poder analisar a evolução da velocidade média é preciso manter as condições de análise as mais próximas possível. Desde modo o período considerado para a análise foi o período de seca, envolvendo os meses de maio até setembro. Como as duas frotas possuem porte e limite de velocidade diferentes, são sempre analisadas separadamente. O ano base para comparação é o ano 2019, uma vez que os trabalhos de adequações e o uso das ferramentas de gestão foram iniciados em 2020.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Mapa de calor de velocidade

4.1.1 Tratativa dos dados

A base de dados usada para a construção dos *boxplots* foi de seis dias de operação, totalizando 911.098 registros. Com a "limpeza" pela limitação de velocidade o total de registros reduziu em 3.350, cerca de 0,4% do valor total. As Figuras 24 e 25, que mostram os *boxplots* dos dados sem e com a limitação da velocidade, respectivamente. Nota-se na Figura 25, que sem a limitação de velocidade existem muitos *outliars*, que conforme conhecido são valores irreais, pois as frotas têm limitador físico de velocidade. Porém como se sabe a causa desses valores e é uma quantidade baixa, 3.350 de um total de 911.098 registros, esses dados são descartados.

Figura 24 – *Boxplot* de velocidade sem tratativa.

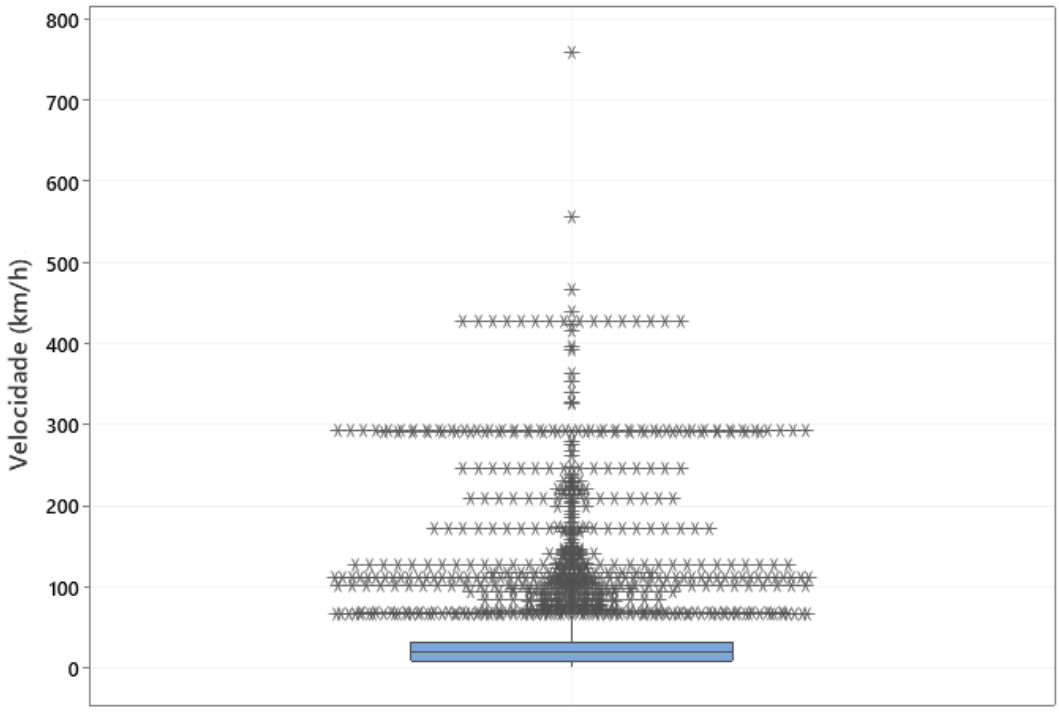
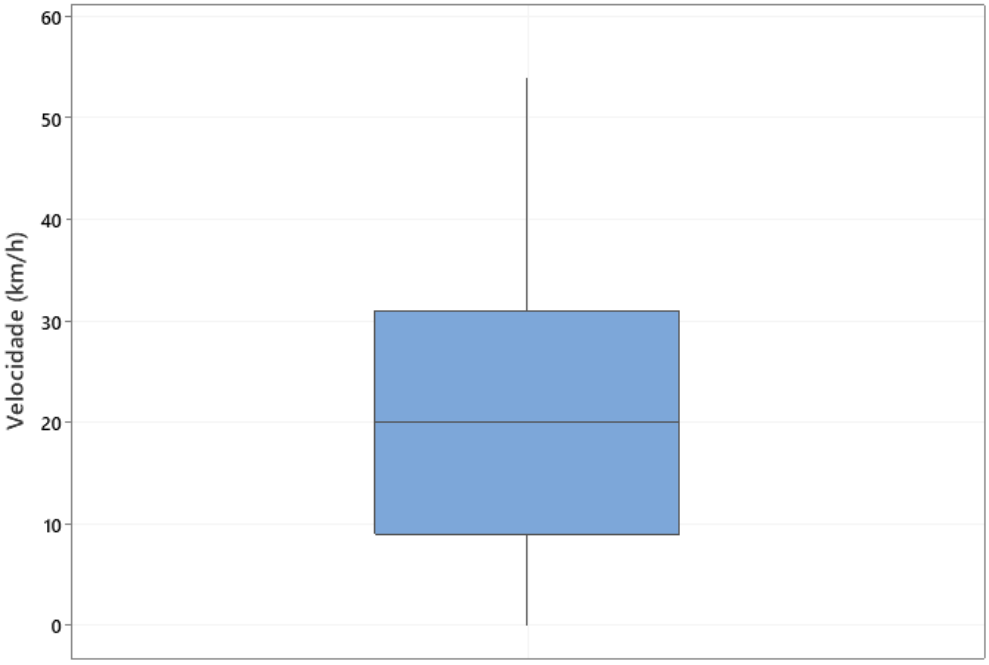


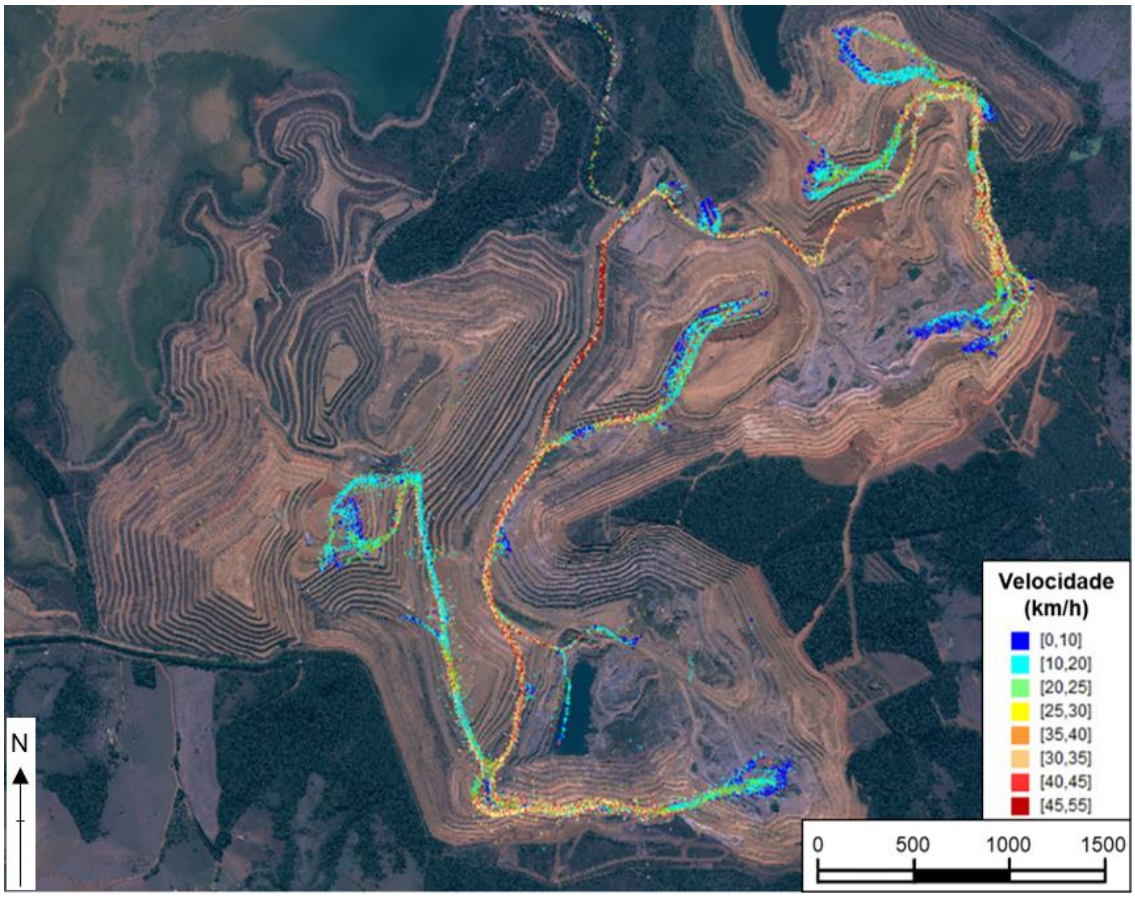
Figura 25 – *Boxplot* de velocidade com tratativa.



4.1.2 Mapa

Com os dados de registro de velocidades importados no *software* de planejamento de lavra combinado com o mapa da mina gerou-se um mapa de calor de velocidade, Figura 26. Este demonstra, por meio de cores, quais são as velocidades desempenhadas pelos veículos nos acessos da mina. Os tons azuis representam baixa velocidade, enquanto os tons avermelhados mostram velocidades maiores.

Figura 26 – Mapa de calor de velocidade.



Com o mapa, é possível identificar, inclusive com maior acuracidade, os trechos onde há possíveis problemas nas pistas e fazer a correção rapidamente. Ressalta-se que com o mapa de calor de velocidade elimina-se a subjetividade com relação aos pontos de atuação da equipe de apoio, tendo assim um direcionamento de recursos otimizado e com ordem de prioridade.

4.2 Velocidade máxima por trecho

Um ponto bastante importante ao usar o mapa de calor de velocidade é entender qual a velocidade máxima nos diferentes trechos do acesso, como rampas, cruzamentos, saídas de praças e chegadas em pontos de básculas. Sem essa premissa pode ser entendido que há algum defeito na pista.

A resistência ao rolamento pode ser estimada através das Tabelas II, IV e V. Após avaliação em campo foi preenchido as tabelas e obtido o valor de RDS para as estradas primárias e secundárias, Figura 27.

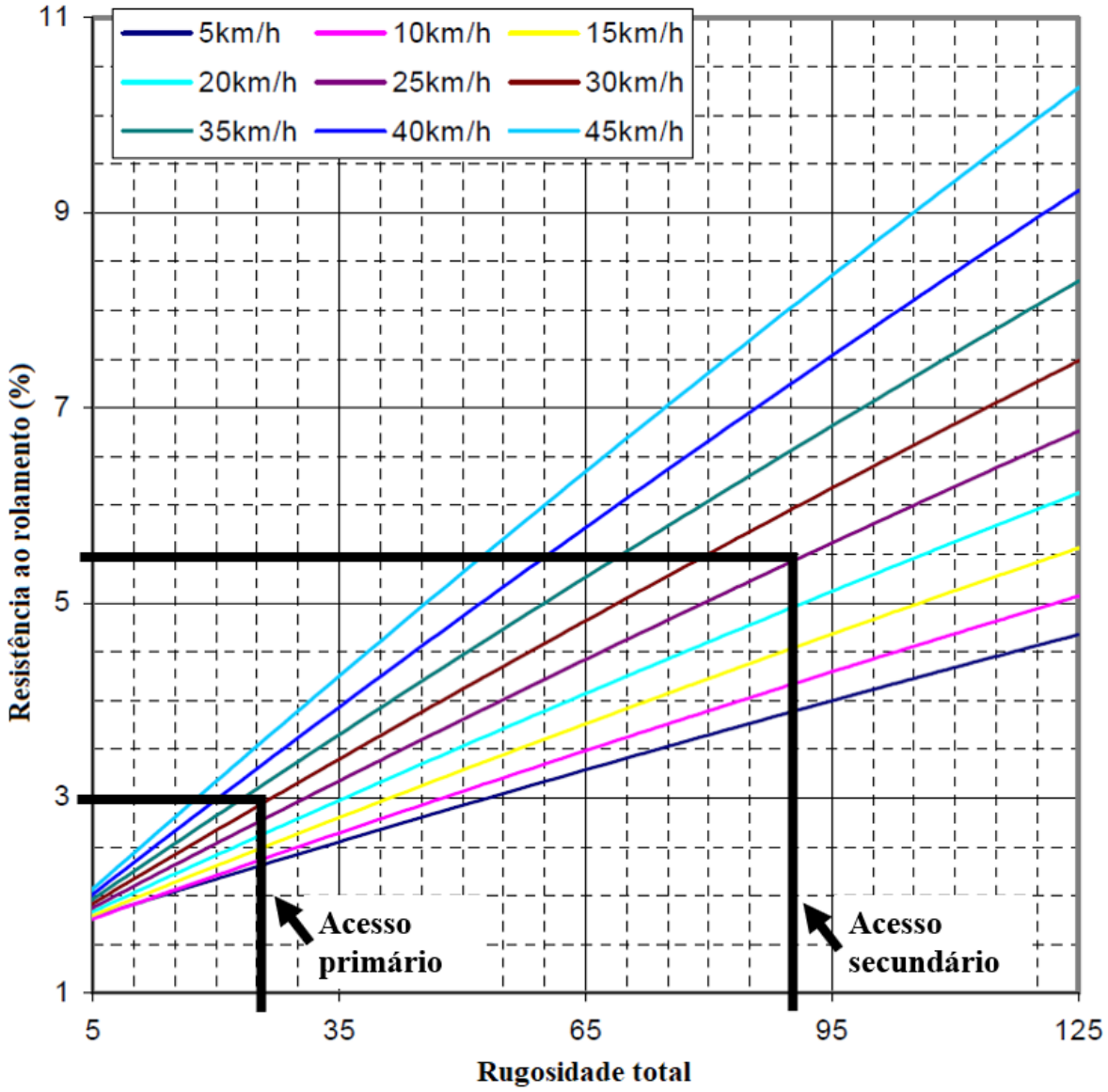
Figura 27 – RDS de estradas primárias e secundárias.

DEFEITO (estradas primárias)	RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO GRAU (1-5)	EXTENSÃO (1-5)	NOTA DO DEFEITO
Buracos/Borrachudos	2	2	4
Costelas	2	2	4
Afundamento de pneus	1	2	2
Material solto	3	3	9
Rochas fixas	2	3	6
RUGOSIDADE TOTAL (RDS) RDS = ∑ (Grau x Extensão)			**25**
RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO ESTIMADA (%)			

DEFEITO (estradas secundárias)	RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO GRAU (1-5)	EXTENSÃO (1-5)	NOTA DO DEFEITO
Buracos/Borrachudos	4	4	16
Costelas	3	4	12
Afundamento de pneus	4	5	20
Material solto	5	5	25
Rochas fixas	4	4	16
RUGOSIDADE TOTAL (RDS)			**89**
RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO ESTIMADA (%)			

Com o valor do RDS recorreu-se ao gráfico da Figura 16 para estimar a resistência ao rolamento. Para as pistas primárias foi obtido um valor de cerca de 3% e para as pistas secundárias cerca de 5,5%. Os resultados podem ser vistos na Figura 28.

Figura 28 – Resistência ao rolamento para vias primárias e secundárias.



Para melhor entendimento dos pontos de menor velocidade no mapa foi estimado as velocidades máximas nos trechos de rampas para acessos primários e secundários, Tabela VIII. A tabela VIII foi criada com base na curva de *rimpull* apresentada na Figura 8.

Tabela VIII – Velocidade máxima conforme inclinação de acesso.

Trecho	Resistência ao rolamento (%)	Gradiente de rampa (%)	Resistência total (%)	Velocidade Máxima (km/h)	
				Cheio	Vazio
Acessos primários	3,0	4,0	7,0	21,0	51,0
Acessos primários	3,0	6,0	9,0	16,0	42,0
Acessos primários	3,0	8,0	11,0	14,0	33,0
Acessos primários	3,0	10,0	13,0	12,0	28,0
Acessos Secundários	5,5	4,0	9,5	16,0	38,0
Acessos Secundários	5,5	6,0	11,5	13,0	33,0
Acessos Secundários	5,5	8,0	13,5	11,0	27,0
Acessos Secundários	5,5	10,0	15,5	10,0	23,5

O uso da curva *rimpull* é importante para que a meta de velocidade esteja conforme a capacidade do caminhão devido à resistência total da pista.

4.3 Adequações de vias

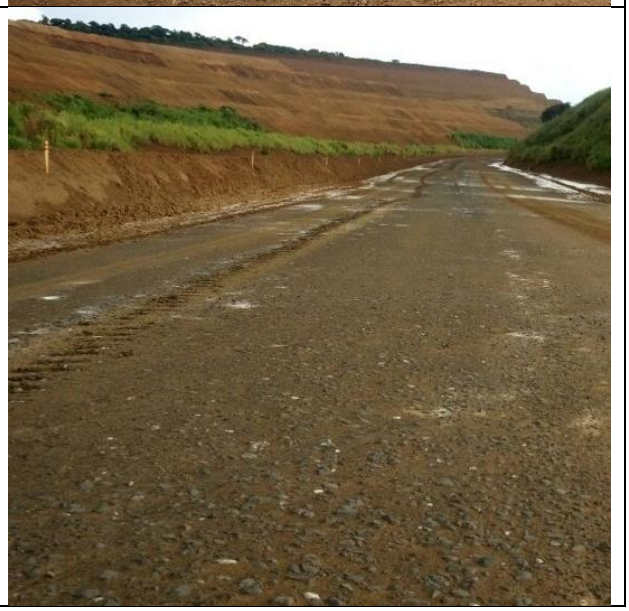
Com o padrão definido no item 3.2.3 foi iniciado o uso do mapa de calor e feitas as adequações nos pontos identificados, conforme o projeto de acessos de mina. Os principais desvios encontrados foram pontos de estreitamento e de revestimento dos acessos. No primeiro caso, foram executados trabalhos de alargamento para adequação à largura estabelecida pelo projeto de estradas possibilitando assim o trânsito de dois caminhões, sem a necessidade de pontos de espera, ou seja, estrangulamento.

Com relação aos borrachudos, a remoção do material e aplicação de um revestimento de 200 mm de espessura foi necessária. Este material foi composto por 3 partes de laterita para 1 parte de argila amarela, Figura 29, sendo todos estes produtos encontrados na própria mina. O uso destes materiais como revestimento foi sugerido após ensaios de laboratório por uma equipe de consultoria.

Figura 29 – Revestimento da via.

A Tabela IX apresenta exemplos de atuações realizadas após serem identificadas pelo mapa de calor de velocidade.

Tabela IX – Atuações feitas nos acessos.

Correção de drenagem	
Aplicação de revestimento	

A Figura 30 demonstra o uso do mapa de calor de velocidade na identificação de pontos com baixa velocidade possibilitando um rápido direcionamento dos recursos para manutenção da pista. Pode ser notado a evolução alcançada nas regiões de atuação depois do período de 5 dias no mês de junho de 2020, Figura 31.

Figura 30 – Acompanhamento do mapa de calor de velocidade.

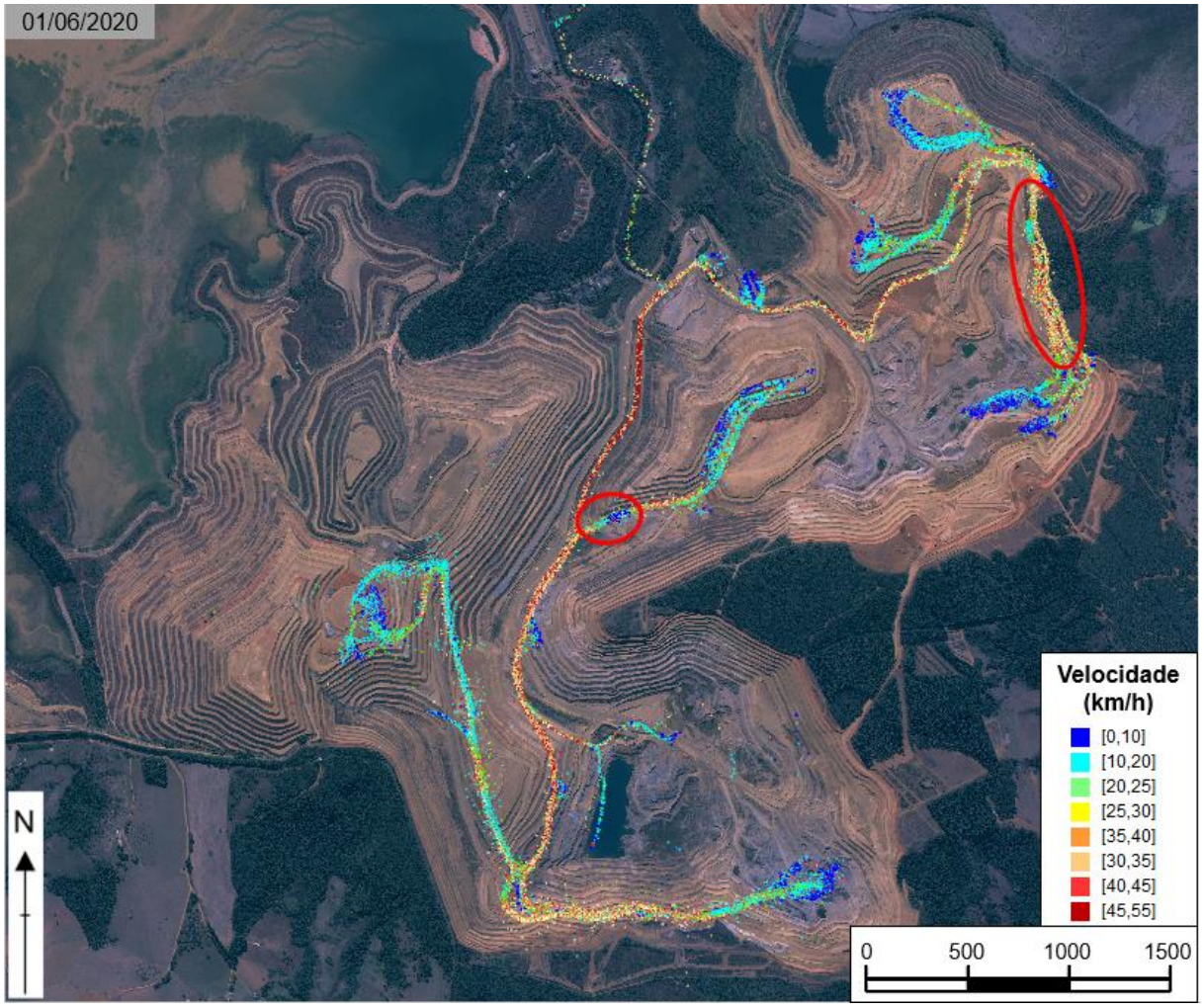
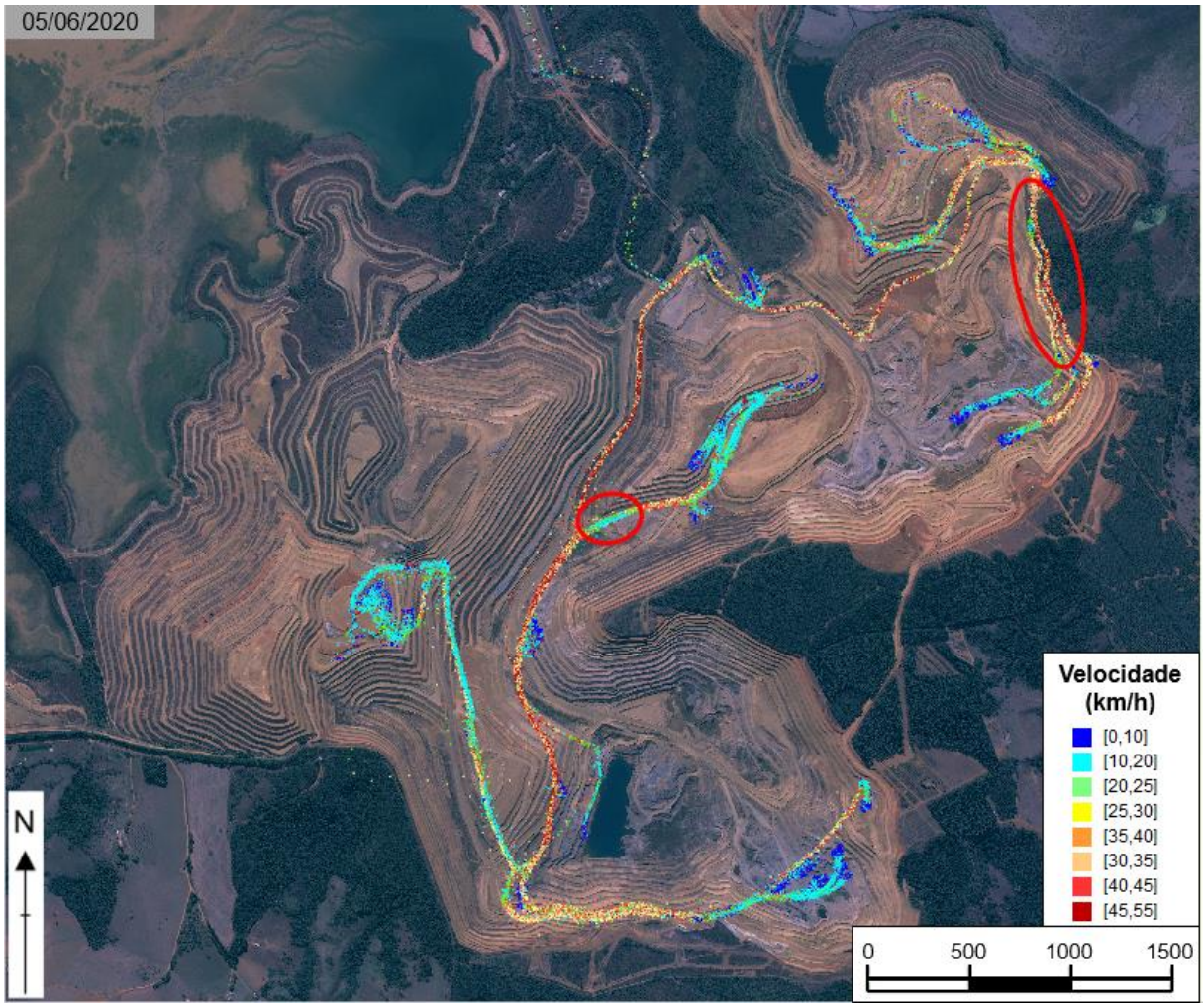


Figura 31 – Evolução com o uso do mapa de calor de velocidade.

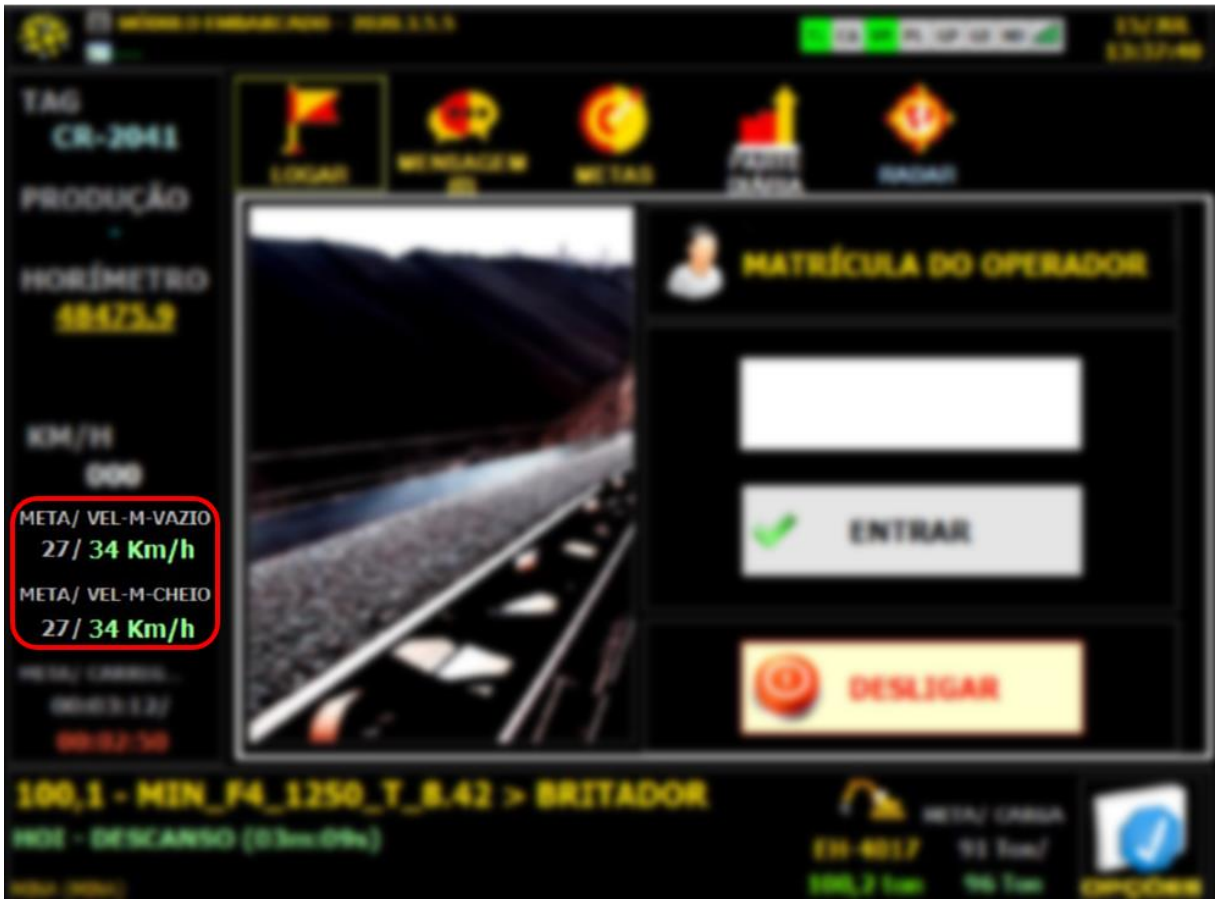


4.4 Relatórios para gestão da velocidade

Cada caminhão possui um *tablet* embarcado no qual são feitas as apropriações para o sistema de gerenciamento da frota. Foi inserido na janela principal do *tablet* a informação de velocidade média após cada ciclo, Figura 32, formatado condicionalmente com relação a meta de velocidade, sendo:

- Verde – maior ou igual a 100% meta.
- Amarelo – entre 95% e 100% da meta.
- Vermelho – abaixo de 95% da meta.

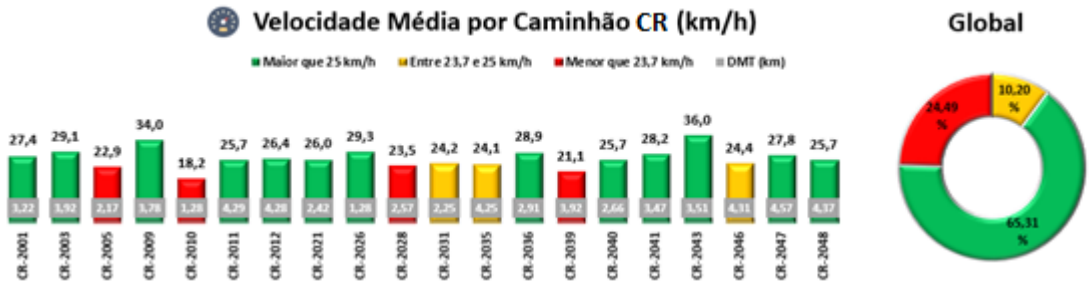
Figura 32 – Relatório de velocidade dentro do caminhão.



O operador consegue acompanhar o seu desempenho a cada ciclo, e com isso trabalhar para estar sempre desempenho da melhor forma de acordo com a condição da pista. Quando o operador não está atingindo a meta, ele pode interagir com os técnicos de modo a solicitar melhoria em algum trecho do trajeto.

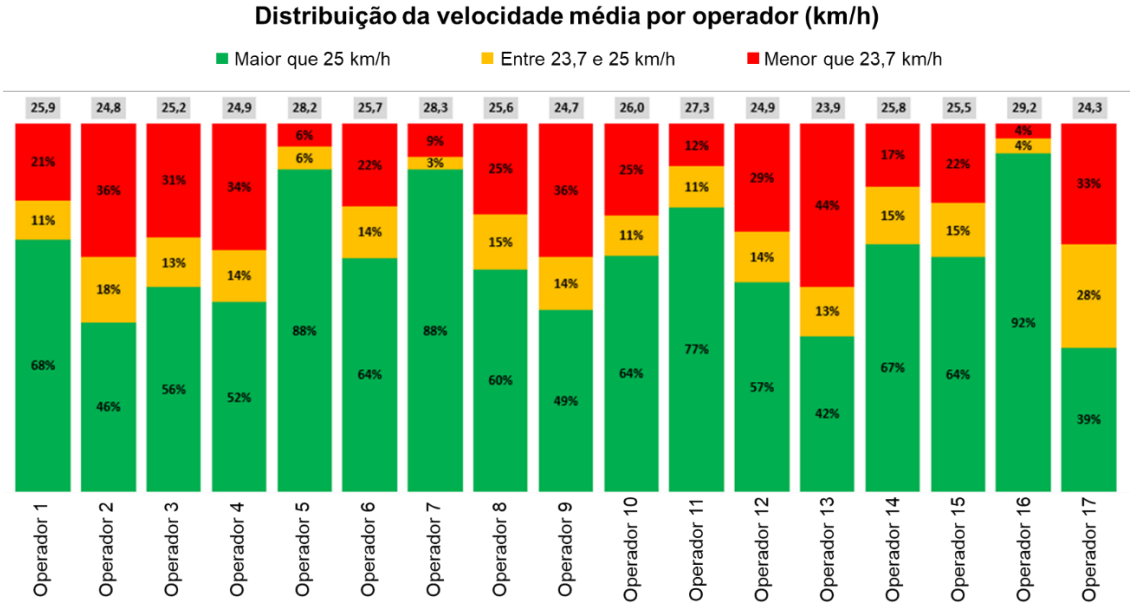
O relatório de *business intelligence*, que mostra a velocidade média de cada equipamento, apresenta a mesma condição de formatação (verde, amarelo e vermelho) para o desempenho de todos os caminhões, Figura 33. Com essa informação pode-se comparar o desempenho de caminhões que estão rodando em mesmas condições e também gera uma competição saudável na equipe.

Figura 33 – Gestão a vista de velocidade média.



Para uma gestão mais direcionada do supervisor foi criado o relatório mostrado na Figura 34, com esse relatório e o conhecimento do gestor da equipe pode ser mapeado operadores que estão com desempenho menor que os demais. Assim pode ser feito algum trabalho com o operador de modo a entender dificuldades e ajudá-lo a melhorar seus indicadores.

Figura 34 – Gestão a vista de velocidade média.



O relatório apresentado Figura 34, também apresenta formatação condicional e mostra em um gráfico de coluna empilhada, o percentual de viagens em cada uma das três categorias de cor. Esse relatório é usado em um período de no mínimo 1 mês, pois nesse intervalo os operadores apresentam uma quantidade de viagens acima de 300 e tendem a operar em

condições mais próximas um dos outros. Os nomes foram retirados do relatório por questão de privacidade.

Um ponto importante a se ressaltar com todos esses relatórios de gestão é como foi a receptividade da equipe. Toda implantação teve um acompanhamento muito próximo do time, e os relatórios foram construídos de forma conjunta, assim desde o início teve-se entendimento e foco de todos. No dia a dia, algo que contribuiu bastante para todas as evoluções foi o comportamento dos operadores, antes quando era identificado um problema na pista pelo operador, o mesmo ficava na maioria das vezes calado. Hoje como ele precisa tem seu resultado acompanhado, ao identificar um problema na pista ele aciona o supervisor e pede apoio para solucionar o problema, e assim rapidamente o defeito na pista é corrigido e ele e os colegas conseguem transitar de forma mais segura e dentro da velocidade média de projeto da pista.

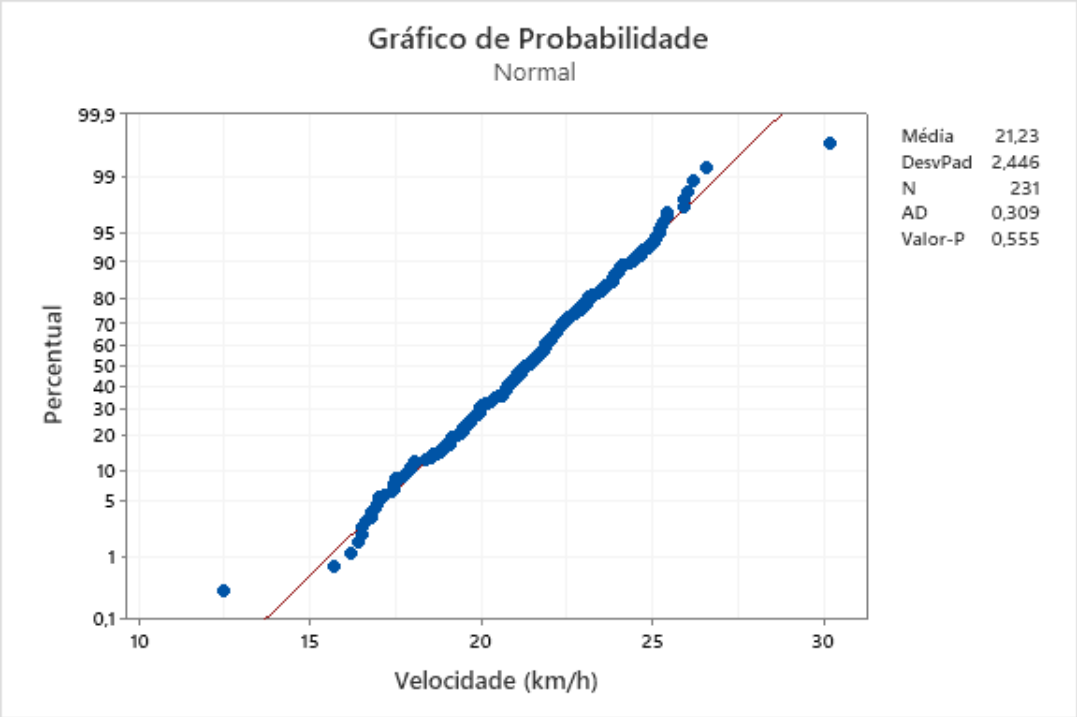
4.5 Análises estatísticas

4.5.1 Ano 2019

Para analisar a evolução da velocidade média é preciso manter as condições de análise as mais próximas possíveis. Desde modo o período considerado para a análise foi o período de seca, envolvendo os meses de maio até setembro. Como as duas frotas, CR e KM, possuem porte e limite de velocidade diferentes, são sempre analisadas separadamente. O ano base para comparação é o ano 2019, uma vez que os trabalhos de adequações e o uso das ferramentas de gestão foram iniciados em 2020.

Primeiramente foi verificado a normalidade da distribuição dos dados de velocidade média. Como a mina tem diferentes frotas, frentes e destinos, foi selecionado uma frota no mesmo ciclo operacional. A Figura 35 apresenta o gráfico de probabilidade dos dados de velocidade do estudo de caso selecionado.

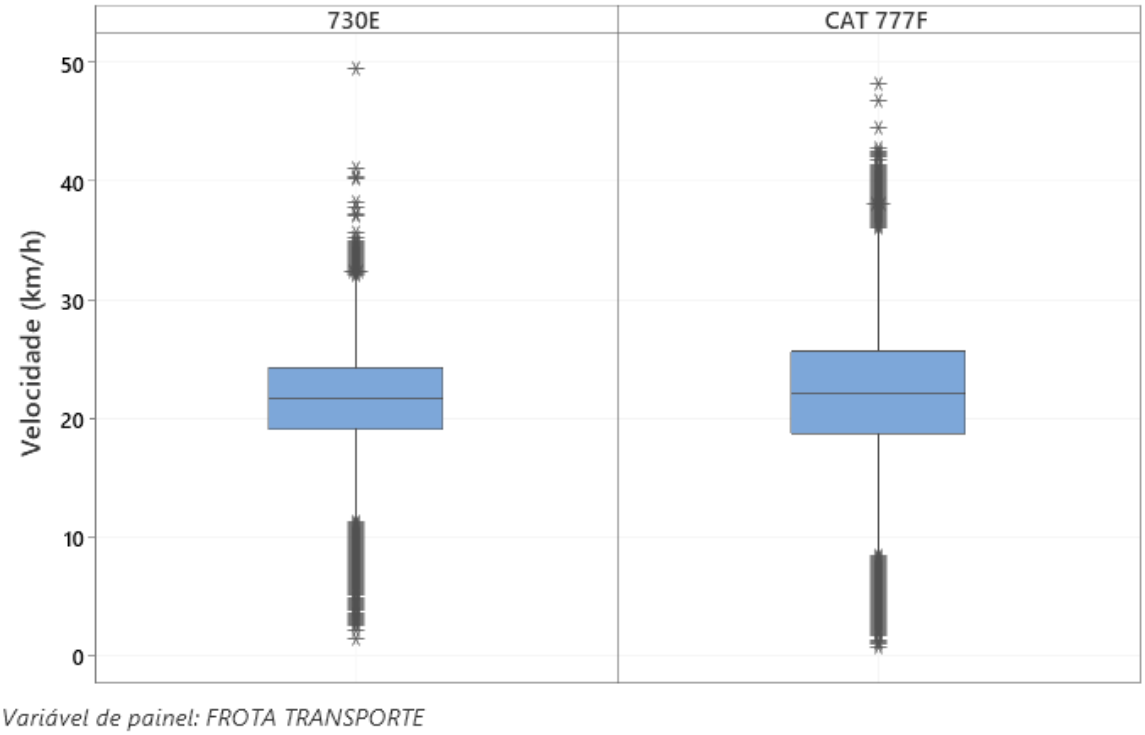
Figura 35 – Teste de normalidade.



Analisando o gráfico, nota-se um valor de p > 0,05. Desta forma pode-se verificar uma distribuição normal dos dados.

A Figura 36 apresenta os *boxplots* das velocidades médias das duas frotas de caminhões no ano de 2019 no período de maio a setembro.

Figura 36 – *Boxplot* de velocidade média 2019 com *outlier*.

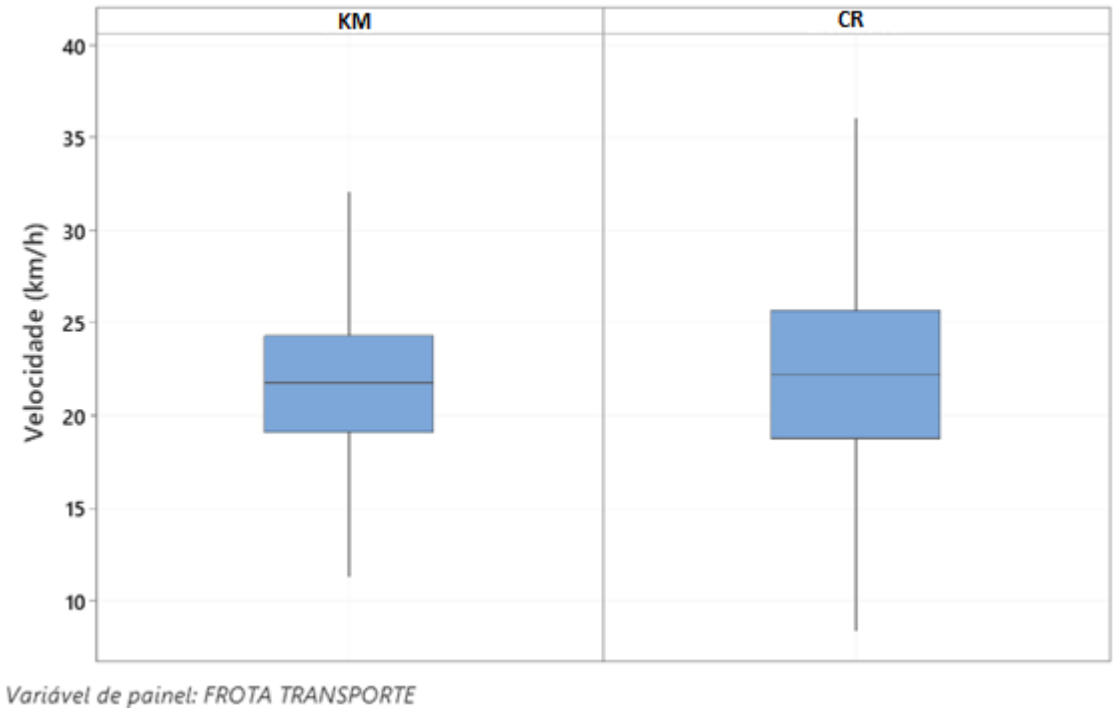


Nota-se na Figura 36, a presença de pontos considerados *outliers*. Através de acompanhamentos de campo foi feita validação dos dados e foi possível identificar fatores contribuintes para *outliers* na velocidade média do ciclo:

- Erro de GPS;
- Erro ou travamento do sistema de gestão da frota;
- Apropriação incorreta do operador;
- Sobrecarga no equipamento.

Por conhecer a origem dos *outliers*, estes foram desconsiderados. Assim, foi gerado novamente os *boxplots* de velocidade média, Figura 37.

Figura 37 – *Boxplot* de velocidade média 2019.



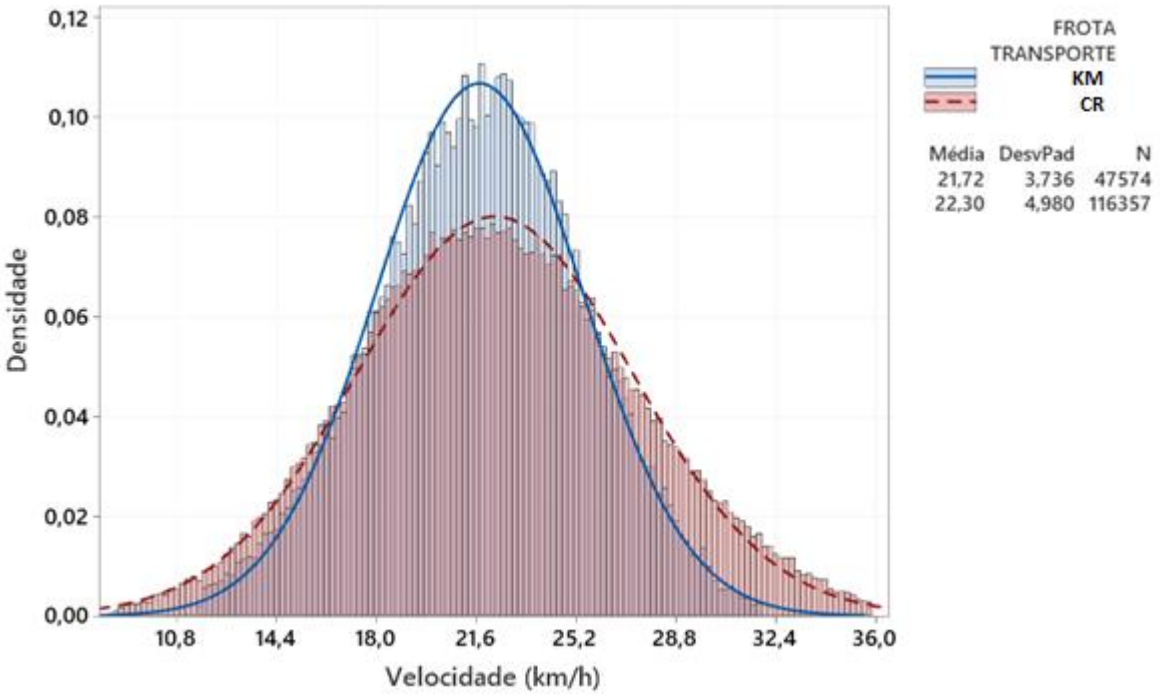
A Tabela X apresenta as estatísticas descritivas das duas frotas de caminhões no ano de 2019 no período de maio a setembro, desconsiderando-se os *outliers*.

Tabela X – Estatísticas descritivas 2019.

FROTA	N	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
KM	47574	21,719	3,736	11,600	19,198	21,811	24,310	31,887
CR	116357	22,304	4,980	8,610	18,814	22,192	25,671	35,899

A distribuição dos dados pode ser verificada nos histogramas apresentado na Figura 38.

Figura 38 – Histograma velocidade média 2019.



Pelos dados apresentados na Figura 38, observa-se uma distribuição normal das velocidades médias. Com relação as diferenças entre as duas frotas dois pontos se destacam, a frota CR tem uma velocidade média um pouco maior, que se deve ao fato de o caminhão ter um limite de velocidade maior e essa frota apresenta uma amplitude maior de velocidade. Esse maior range se deve ao fato de que essa frota por ter um porte menor em alguns momentos opera em algumas frentes de lavra com maior dificuldade operacional, resultando em uma menor velocidade média.

4.5.2 Anos 2020 e 2021

Foram gerados os *boxplots*, as estatísticas descritivas e os histogramas para as velocidades médias das duas frotas nos anos de 2020 e 2021. Esses resultados podem ser vistos nas Figuras 39, 40, 41, 42 e Tabelas XI e XII.

Figura 39 – *Boxplot* de velocidade média 2020.

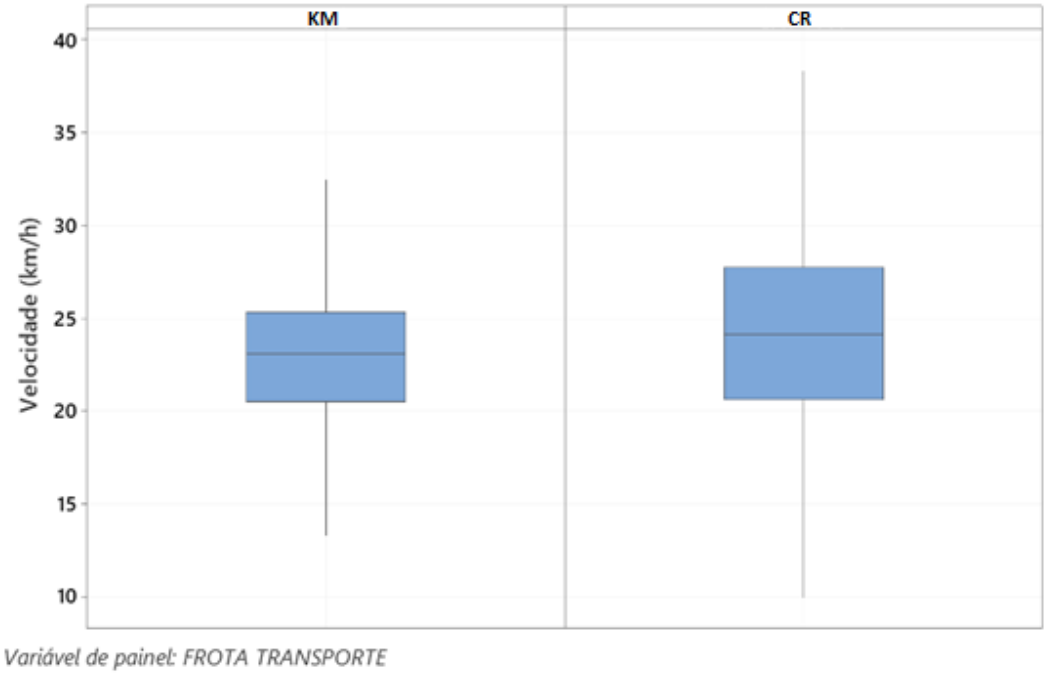


Tabela XI – Estatísticas descritivas 2020.

FROTA	N	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
KM	63827	22,827	3,558	13,301	20,516	23,072	25,339	32,483
CR	124263	24,169	5,168	10,002	20,625	24,116	27,727	38,294

Figura 40 – Histograma velocidade média 2020.

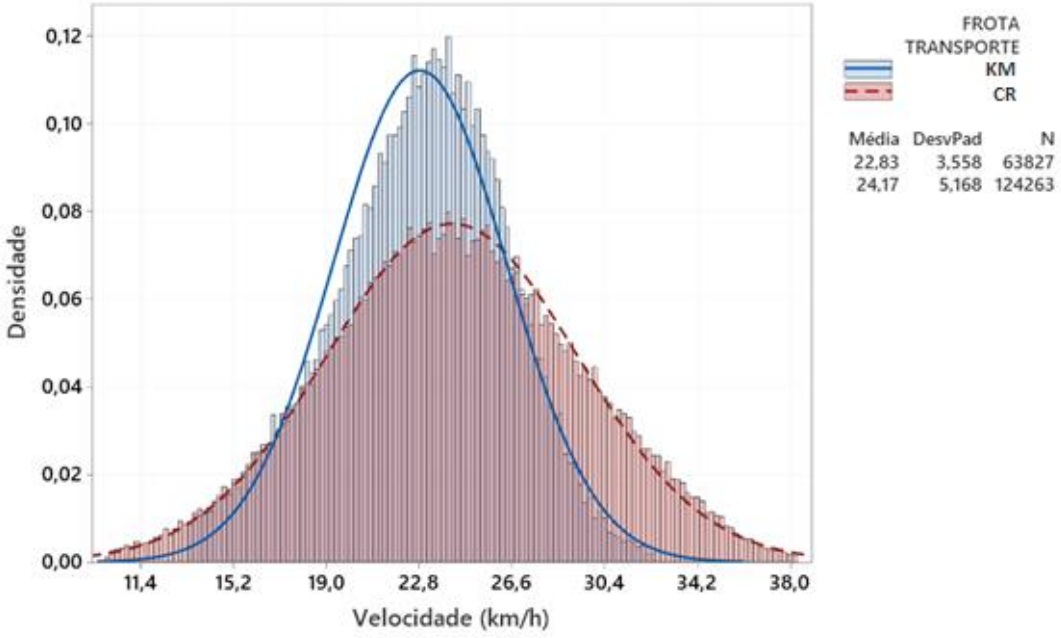


Figura 41 – *Boxplot* de velocidade média 2021.

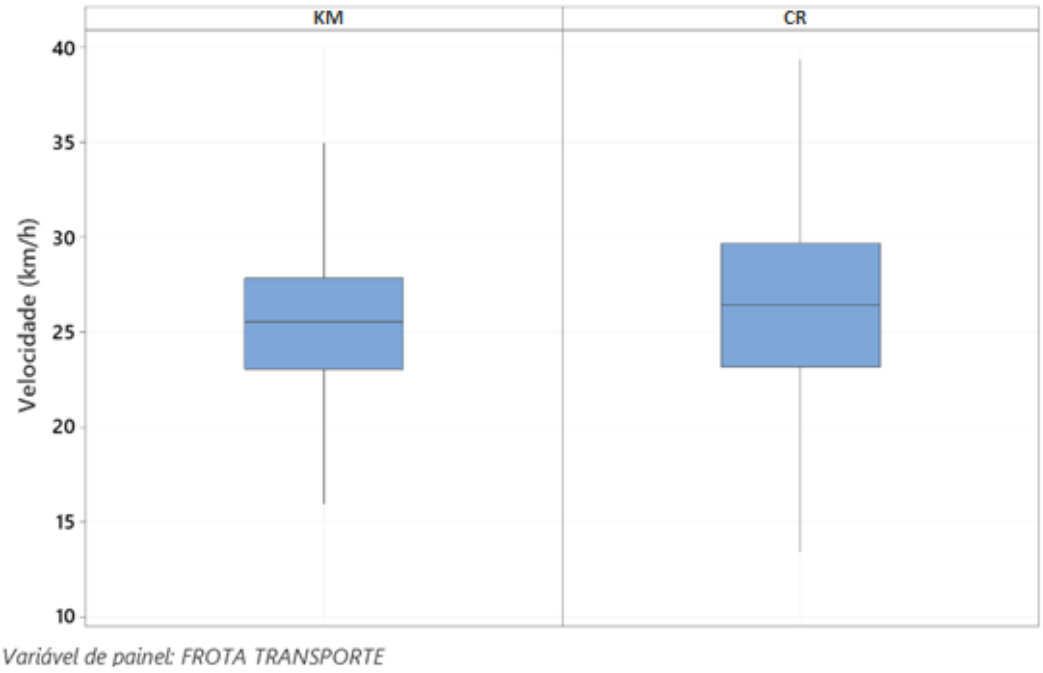
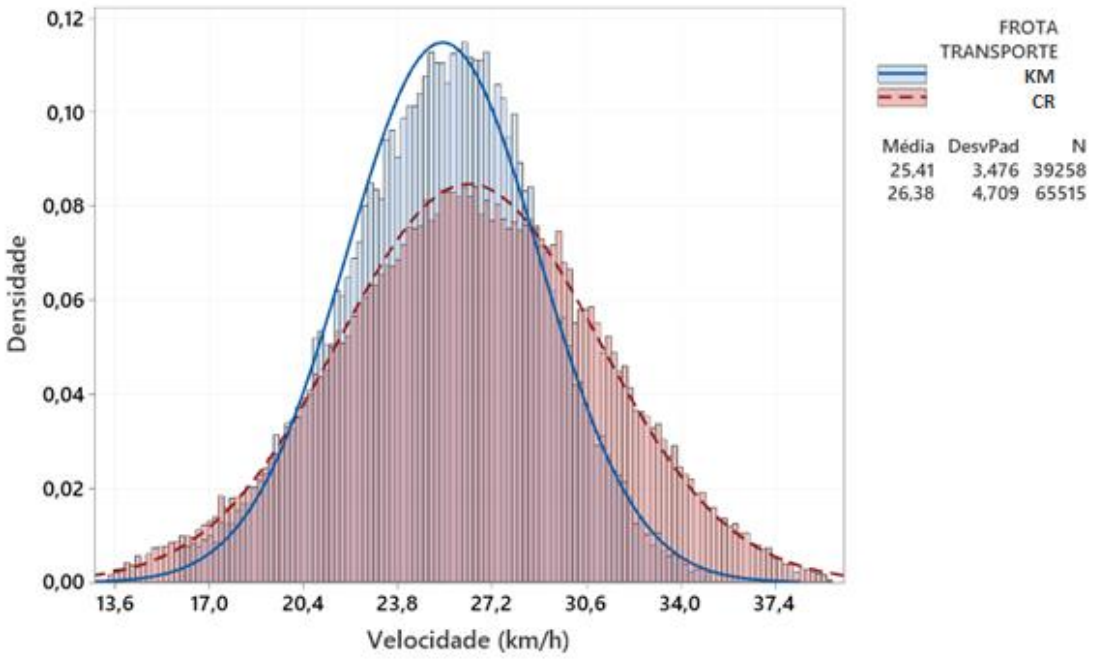


Tabela XII – Estatísticas descritivas 2021.

FROTA	N	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
KM	39258	25,409	3,476	15,901	23,061	25,544	27,842	35,000
CR	65515	26,384	4,709	13,403	23,153	26,418	29,670	39,359

Figura 42 – Histograma velocidade média 2021.



Pelos dados apresentados na Figura 39 e 41, observa-se uma distribuição normal das velocidades médias. As curvas apresentam o mesmo comportamento do ano de 2019, ou seja, a frota de CR tem um maior range no histograma e uma maior velocidade média.

4.5.3 Aumento de velocidade média

A variação da velocidade média ao longo dos anos de 2019, 2020 e 2021 foi analisada separadamente para cada frota. A Figura 43 e a Tabela XIII apresentam os histogramas e estatísticas básicas das frotas nos três anos.

Figura 43 – Evolução histograma velocidade média.

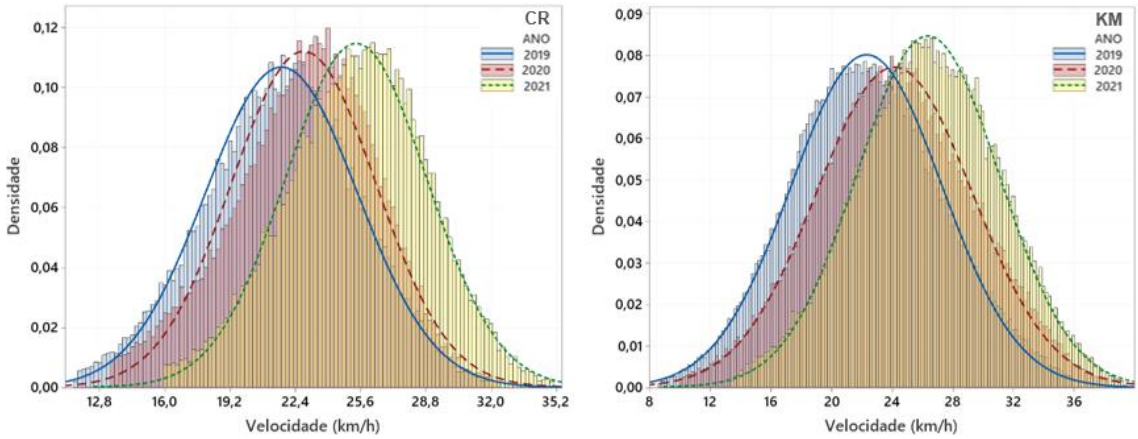


Tabela XIII – Estatísticas descritivas.

Frota	ANO	N	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
CR	2019	116357	22,304	4,980	8,610	18,814	22,192	25,671	35,899
CR	2020	124263	24,169	5,168	10,002	20,625	24,116	27,727	38,294
CR	2021	65515	26,384	4,709	13,403	23,153	26,418	29,670	39,359
KM	2019	47574	21,719	3,736	11,600	19,198	21,811	24,310	31,887
KM	2020	63827	22,827	3,558	13,301	20,516	23,072	25,339	32,483
KM	2021	39258	25,409	3,476	15,901	23,061	25,544	27,842	35,000

Nota-se, através da Figura 43, que os gráficos mostram um aumento da velocidade média nas duas frotas nos anos 2020 e 2021 quando comparados ao ano anterior. A tabela XIII mostra, para a frota CR, que a média aumenta de 22,304 km/h para 24,169 km/h de 2019 para 2020. Esse aumento representa uma elevação de 8,4%. De 2020 para 2021 a média evoluiu de 24,160 km/h para 26,384 km/h, representando um aumento de 9,2%.

Para a frota KM a média aumenta de 21,719 km/h para 22,827 km/h de 2019 para 2020, uma elevação de 5,1%. De 2020 para 2021 a média evoluiu de 22,827 km/h para 25,409 km/h, representando um aumento de 11,3%.

Para comprovação dos resultados, foram feitos testes de hipótese, a um nível de confiança de 95%, para verificar estatisticamente se houve aumento de velocidade de 2019 para 2020, e de 2020 para 2021, Tabelas XIV e XV.

Tabela XIV – Teste de hipótese CR.

Hipótese nula	H_0: 2020 - 2019 = 0		Hipótese nula	H_0: 2021 - 2020 = 0	
Hipótese alternativa	H_1: 2020 - 2019 > 0		Hipótese alternativa	H_1: 2021 - 2020 > 0	
Valor-T	**GL**	**Valor-p**	**Valor-T**	**GL**	**Valor-p**
-90,15	2E+05	0,000	-94,18	1E+05	0,000

Tabela XV – Teste de hipótese KM.

Hipótese nula	H_0: 2020 - 2019 = 0		Hipótese nula	H_0: 2021 - 2020 = 0	
Hipótese alternativa	H_1: 2020 - 2019 > 0		Hipótese alternativa	H_1: 2021 - 2020 > 0	
Valor-T	**GL**	**Valor-p**	**Valor-T**	**GL**	**Valor-p**
-49,96	99671	0,000	-114,78	84544	0,000

Os resultados dos testes apresentam um valor-p menor que 0,05, confirmando as hipóteses alternativas, portanto, houve aumento de velocidade de 2019 para 2020 e de 2020 para 2021. Um ponto bastante importante a se ressaltar com todo esse trabalho é o fato de que a velocidade máxima projetada para as pistas sempre foi respeitada e que em todo o período analisado não houve nenhum acidente relacionado a excesso de velocidade.

4.6 Aumento de produtividade

Com o aumento de velocidade pode ser verificado ganho de produtividade. Para essa análise as frotas foram analisadas individualmente. O cálculo da produtividade foi feito usando a Equação 5.

De modo a se obter o ganho de produtividade, com exceção da velocidade, todas as outras variáveis foram fixadas. As cargas médias usadas para o cálculo foram os *payloads* dos caminhões, DMT e os tempos (tempos médios do ano de 2019), Tabela XVI.

Tabela XVI – Dados para cálculo de produtividade.

Dado	Valor
DMT (m)	2.952
Tempo Fixo CR (min)	5,4
Tempo Fixo KM (min)	7,9
Carga CR (t)	96
Carga KM (t)	186

Com o uso da Equação 5 foi calculado o ganho de produtividade baseado no aumento de velocidade média, Tabela XVII.

Tabela XVII – Aumento de produtividade (t/h).

Frota	2019	2020	2021
CR	271	287	306
KM	461	477	511

O aumento de produtividade na frota de CR foi de 6,1% de 2019 para 2020 e 6,5% de 2020 para 2021. Nos caminhões KM foi de 3,4% de 2019 para 2020 e 7,2% de 2020 para 2021

4.7 Impacto financeiro

Considerando o período de maio até setembro a frota CR operou em média 53,8 mil horas e a frota de KM cerca de 22,2 mil horas. Com a produtividade e as horas trabalhas pode ser calculado a produção das duas frotas no período. Ao aumentar a produtividade, para se fazer a mesma produção são necessárias menos horas trabalhadas. Com isso pode ser estimado um impacto financeiro baseado na redução de horas operadas. Dois fatores são considerados: preço da hora de aluguel do caminhão e o consumo horário de diesel do equipamento.

Os ganhos com o aumento de produtividade são apresentados na Tabela XVIII, que representa uma economia em função da menor quantidade de horas trabalhadas.

Tabela XVIII – Ganho com o aumento de produtividade (R$).

Frota	2020	2021	Total
CR	967.244,11	971.120,47	1.938.364,58

KM	380.906,77	758.730,28	1.139.637,05
Total	**1.348.150,88**	**1.729.850,75**	**3.078.001,62**

Pode ser observado uma economia de R$ 1,348 milhões no ano de 2020 e de R$ 1,739 no ano de 2021, resultando em um total de R$ 3,078 milhões nos dois anos. É importante ressaltar que essa economia de diesel representa uma redução de consumo de 600 mil litros nos dois anos. Os ganhos foram estimados para o período dos meses de maio até setembro, portanto os demais meses também podem ter apresentado ganhos. Porém, por ser um período de alta incidência pluviométrica, que impacta diretamente no indicador de velocidade, foi desconsiderado.

Além dos ganhos diretos do aumento de produtividade, existem outros ganhos que devem ser citados com a melhoria das condições de acessos, como a economia de manutenção e materiais e desgaste e redução do consumo de diesel dos demais equipamentos que transitam na mina.

4.8 Demais ganhos

Além dos ganhos nos indicadores de performance, existem outros ganhos com a implantação das ferramentas, estes são:

- Eliminação da subjetividade no direcionamento dos recursos de infraestrutura de mina;
- Padronização da gestão e acompanhamento da velocidade média;
- Melhoria nas condições de segurança das vias;
- Melhoria nas condições de ergonomia da condição operacional reduzindo risco de doenças e/ou lesões ocasionadas por vibração;
- Satisfação dos funcionários;
- Desenvolvimento dos operadores dos equipamentos de transporte;
- Alguns ganhos intangíveis como: diminuição da emissão de CO2, menos consumo de pneus e materiais de desgaste dos caminhões.

5 CONCLUSÕES

A implementação da ferramenta mapa de calor de velocidade para padronização e direcionamento dos recursos da infraestrutura de mina mostrou-se satisfatória. Melhorou a rotina da operação de mina de tal forma que possibilita identificação rápida de pontos problemáticos nas vias de transporte e o direcionamento dos recursos de infraestrutura para manutenção desses pontos. Essa rápida identificação e atuação nos defeitos das pistas melhoram a condição de segurança das pistas. Quando observado do ponto de vista do controle de qualidade, os relatórios de gestão da velocidade média possibilitam de forma consistente uma atuação na mão de obra, no meio ambiente, nos equipamentos e métodos. Com a implantação desses relatórios foi observado uma grande evolução da equipe na parte de foco em resultado e operação segura. Logo os líderes conseguem mapear e desenvolver suas equipes e os liderados tem informação em tempo real de seu desempenho, fazendo interação com o líder e o time para melhorar o desempenho e a qualidade dos acessos.

Os resultados do trabalho mostraram um aumento de produtividade de 6,1% de 2019 para 2020 e 6,5% de 2020 para 2021 na frota de CR. Nos KM foi de 3,4% de 2019 para 2020 e 7,2% de 2020 para 2021. No geral, um aumento de produtividade de 13% para a frota CR e 10,8% para a frota KM. Essa elevação na produtividade resulta em uma menor quantidade de horas trabalhas, que equivale a um menor gasto com aluguel do caminhão e menor consumo de diesel. Essa economia representa cerca de R$ 1,348 milhões no ano de 2020 e de R$ 1,739 no ano de 2021, resultando em um total de R$ 3,078 milhões.

É importante ressaltar que todos os ganhos obtidos em velocidade média foram sempre aderentes aos limites de velocidade média da mina, o foco das ações foi nos trechos de baixa velocidade e na gestão da equipe de forma a buscar maior consistência nos resultados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho, surgiram ideias que podem ser estudadas de forma mais aprofundada. Dentre elas destacam-se:

- Uso da telemetria para atuar nos pontos de diferença de pressão nos pneus.
- Uso de topografia para atuação em pontos de empoçamento de água.
- Padronização da metodologia de manutenção dos acessos com escolha de prioridades.

REFERÊNCIAS

ADAIR, L. *et al*. Rolling resistance in Haul Truck operations. **Australian Mining**, v. 107, n. 6, 2015.

ALARIE, S.; GAMACHE, M. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. **International Journal of Surface Mining**, Reclamation and Environment, v. 16, n. 1, p. 59–76, 2002.

ALMEIDA, C. M.; NEVES, T. de C.; FIGUEIREDO, A. C. L. de. Estudo de viabilidade econômica do uso de correias transportadoras nas operações de lavra de uma mina de minério de ferro. **19o Simpósio de Mineração**, p. 1–11, 2018.

AMARAL, M. do; PINTO, L. R. Planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto com alocação de equipamentos de carga. **XLIISBPO**, p. 1177–1188, 2009.

BAEK, J.; CHOI, Y. Simulation of truck haulage operations in an underground mine using big data from an ICT-based mine safety management system. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 13, p. 1–17, 2019.

BALARAJU, J.; GOVINDA RAJ, M.; MURTHY, C. S. Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine -A case study. **Journal of Sustainable Mining**, v. 18, n. 4, p. 257–268, 1 nov. 2019.

BEYGLOU, A. **On the operational efficiency in open pit mines**. 2016. 128 f. Thesis (Mining and Rock Engineering) - Luleå University of Technology, Luleå, 2016.

BLOM, M.; PEARCE, A. R.; STUCKEY, P. J. Short-term planning for open pit mines: a review. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 33, n. 5, p. 318–339, 2019.

BOTELHO, A. H. **Influência da operação de desmonte de rochas no carregamento de material fragmentado**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BRANDÃO, R.; TOMI, G. Metodologia para estimativa e gestão da produtividade de lavra. **Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 1, p. 77–83, 2011.

BRASIL. Ministério do trabalho e emprego. NR 22. **Norma regulamentadora de segurança e saúde ocupacional na mineração**: Brasília, 2016

CALDEIRA, J. **100 Indicadores da Gestão: Key Performance Indicators**. 1. ed. Coimbra: Actual, 2012.

CAMPELO, A. C. de M. M.; MARIN, T.; TOMI, G. F. C. Utilização de dados do sistema de despacho para estimativa de produtividade de transporte no plano de lavra de curto prazo. **Tecnol. Metal. Mater. Miner**, v. 15, n. 2, p. 86–90, 2018.

CATERPILLAR. **Capturing Data. Delivering results VIMS System**. [S.l: s.n.], 2009.

_____. **Controle de Análise de Estrada**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/support/operations/technology/fleet-management-solutions/road-analysis-control.html>. Acesso em: 27 out. 2020.

CHANDA, E. K.; HARDY, R. J. Selection criteria for open pit production equipment - Payload distributions and the "10/10/20" policy. **35th APCOM Symposium - Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry**, Proceedings, n. September, p. 351–364, 2011.

CORONADO, P. P. V. **Optimization of the haulage cycle model for open pit miningusing a discrete-event simulator and a context-based alert system**. 2014. 157 f. Thesis (Master in Mining Engineering) - The University of Arizona, Tenpe, 2014.

CORRAL, R. **KPIs útiles**. Barcelona: LEEXONLINE, 2017.

CORRÊA, M. *et al*. The loss of productivity and costs associated with the premature scrapping of mining trucks tires. **24th World Mining Congress Proceedings**, p. 271–280, 2016.

COSTA, F. P. **Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto**. 2005. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

COSTA, F. P.; SOUZA, M. J. F.; PINTO, L. R. Um modelo de programação matemática para alocação estática de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade. **Revista Escola de Minas**, v. 58, n. 1, p. 77–81, 2005.

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

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

_____. **Minas a Céu Aberto: Planejamento de Lavra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

DARLING, P. **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. (US): Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, 2011.

ELBROND, J.; SOUMIS, F. Towards integrated production planning and truck dispatching in open pit mines. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 1, n. 1, p. 1–6, 1987.

FELSCH-JUNIOR, W. S. *et al*. Beneficios de la implementación de un sistema de telemetría para la gestión de las operaciones mineras. **Interfases**, v. 11, p. 87–102, 2018.

FERREIRA, R. M. **Dimensionamento de um Pavimento Experimental para o Tráfego de Caminhões Fora-de-estrada em Planta de Mina**. 2007. 305 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnial) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

FISONGA, M.; MUTAMBO, V. Optimization of the fleet per shovel productivity in surface mining: Case study of Chilanga Cement, Lusaka Zambia. **Cogent Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1-16, 2017.

HASSANIEN, A. E.; DARWISH, A.; ABDELGHAFAR, S. Machine learning in telemetry data mining of space mission: basics, challenging and future directions. **Artificial Intelligence Review**, v. 53, n. 5, p. 3201–3230, 2020.

HELMY, Y. *et al*. A Survey on Effect of KPIs in Higher Education based on Text Mining Techniques. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, v. 11, n. 3, p.1408-1414, 2020.

HOLMAN, P. **Caterpillar Haul Road Design and Management**. St. Charles: [s.n.], 2006.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. **Open Pit Mine Planning and Design: Volume 1 - Fundamentals**. New York: CRC Press, 2013.

KANSAKE, B. A.; FRIMPONG, S. Analytical modelling of dump truck tire dynamic response to haul road surface excitations. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment,** v. 34, n. 1, p. 1-18, 2020.

KRAUSE, A. **Shovel-Truck Cycle Simulation Methods in Surface Mining**. 2006. 133 p. Thesis (MSC in Engineering and Built Environment) - University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2006.

KUMAR, A.; DIMITRAKOPOULOS, R.; MAULEN, M. Adaptive self-learning mechanisms for updating short-term production decisions in an industrial mining complex. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2020.

MATTOS, A. N. **Telemetria e conceitos relacionados**. São José dos Campos: Alessandro Nicoli de Mattos, 2004.

MONIRI-MORAD, A. *et al*. A methodology for truck allocation problems considering dynamic circumstances in open pit mines, case study of the sungun copper mine. **Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik**, v. 34, n. 4, p. 57–65, 2019.

NADER, A. S. **Monitoramento de Taludes via Radar SSR como Indicador Chave de Desempenho Geotécnico Integrado às Atividades Primárias da Cadeia de Valor Mineral**. 2013. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

NEWMAN, A. M. *et al*. A review of operations research in mine planning. **Interfaces**, v. 40, n. 3, p. 222–245, 2010.

NIEDBALSKI, Z.; MAJCHERCZYK, T. Indicative assessment of design efficiency of mining roadways. **Journal of Sustainable Mining**, v. 17, n. 3, p. 131–138, 2018.

OZDEMIR, B.; KUMRAL, M. Simulation-based optimization of truck-shovel material handling systems in multi-pit surface mines. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 95, n. April, p. 36–48, 2019.

PASCH, O.; ULUDAG, S. Optimization of the load-and-haul operation at an opencast colliery. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 118, n. 5, p. 449–456, 2018.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

QUEVEDO, J. M. G. **Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto**. 2009. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2009.

RACIA, I. M.; PERONI, R. D. L. Desenvolvimento De Um Modelo De Dimensionamento. **8° Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / V Congresso de Engenharia de Moçambique**, p. 485–500, 2017.

REIS, M. D. S. **Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra a céu aberto de minério de ferro dentro do quadrilátero ferrífero**. 2014. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação: terraplenagem e escavação de rocha**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2007.

RIOS, R. Ponencias Telemetría, Telemática y la Ubicuidad del dato. **Revista Abierta de Informática Aplicada**, v. 1, n. 1, p. 51–52, 2017.

RODOVALHO et al. Sequential glory hole approach as a new mining method for sustainable operations. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 5, p. 4788–4796, 2019.

RODOVALHO, E. C. **Aplicações de ferramentas de simulação em operações mineiras para determinação de índices operacionais utilizados em planos de lavra adaptados ao estudo de caso da mineração Casa de Pedra – CSN (Congonhas/MG)**. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

RODOVALHO, E. C.; LIMA, H. M.; TOMI, G. De. New approach for reduction of diesel consumption by comparing different mining haulage configurations. **Journal of Environmental Management**, v. 172, p. 177–185, 1 maio 2016.

RODRIGUES, L. F.; PINTO, L. R. Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto. **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 3, p. 377–384, 2012.

ROGERS, W. P. *et al*. Automation in the Mining Industry. **Review of Technology, Systems, Human Factors, and Political Risk**. p. 607–631, 2019.

SUEK. **Mining**. Disponível em: <http://www.suek.com/our-business/production/> Acesso em: 17/07/2021.

TA, C. H. *et al.* A stochastic optimization approach to mine truck allocation. International **Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 19, n. 3, p. 162–175, 2005.

TEIXEIRA, L.; MUNARETTI, E.; FERNANDES, V. Payloads analysis using telemetry. **24th WORLD MINING CONGRESS PROCEEDINGS**, p. 189–197, 2016.

THOMPSON, R. J.; PERONI, R.; VISSER, A. T. **Mining Haul Roads: Theory and Practice**. Leiden: CRC Press, 2019.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. Mine haul road maintenance management systems. Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, v. 103, n. 5, p. 303–312, 2003.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. Selection, performance and economic evaluation of dust palliatives on surface mine haul roads. **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 107, p. 435–450, 2007.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. The functional design of surface mine haul roads Figure 1-Three components of a total haul road design strategy. **The South African Institute of Mining and Metallurgy**, p. 169–180, 2000.

THOMPSON, V.; VISSER, A. The Impact of Rolling Resistance on Fuel, Speed and Costs. **HME 2006: Continuous Improvement Case Studies**, p. 1–16, 2006.

TONCHIA, S.; QUAGINI, L. **Performance Measurement**. 1. ed. Heidelberg: Springer, 2010.

UPADHYAY, S. *et al*. A simulation model for estimation of mine haulage fleet productivity. **Springer Series in Geomechanics and Geoengineering**, p. 42–50, 2020.

WEBER, A.; THOMAS, R. **Key Performance Indicators: measuring and managing the maintenance funtion**. Ontario: IVARA Corporation, 2005.

WEBSTER, J. **Electrical measurements, signal processing, and displays**. Boca Raton: CBR, 2004.

YARDIMCI, A. G.; KARPUZ, C. Shortest path optimization of haul road design in underground mines using an evolutionary algorithm. **Applied Soft Computing Journal**, v. 83, p. 1–19, 2019.