

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E MATERIAIS

ALFREDO EMÍLIO GONÇALVES SILVA

ANÁLISE DE QUALIDADE DE ESTRADAS DE MINERAÇÃO UTILIZANDO
INDICADORES OPERACIONAIS

Porto Alegre

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E MATERIAIS

ANÁLISE DE QUALIDADE DE ESTRADAS DE MINERAÇÃO UTILIZANDO
INDICADORES OPERACIONAIS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Porto Alegre
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann,

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Afonso Reguly

Vice-Coordenadora: Andréa Moura Bernardes

Silva, Alfredo Emílio Gonçalves
ANÁLISE DE QUALIDADE DE ESTRADAS DE MINERAÇÃO
UTILIZANDO INDICADORES OPERACIONAIS / Alfredo Emílio
Gonçalves Silva. -- 2020.
108 f.

Orientador: Rodrigo de Lemos Peroni.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Estrada de mineração. 2. Projetos de estradas.
3. Sistema de monitoramento de equipamentos. I.
Peroni, Rodrigo de Lemos, orient. II. Título.

ALFREDO EMÍLIO GONÇALVES SILVA

ANÁLISE DE QUALIDADE DE ESTRADAS DE MINERAÇÃO UTILIZANDO
INDICADORES OPERACIONAIS

Essa dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração tecnologia mineral, ambiental e metalurgia extrativa e aprovado em sua forma final pelo Orientador e Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Aprovado em: 02/10/2020

BANCA EXAMINADORA

Alex Theo Visser (Doutor) – University of Pretoria

Filipe Schmitz Beretta (Doutor) – Great Panther

Jorge Danano Gavronski (Doutor) – UFRGS (PPGE3M)

Dedico aos meus pais, Ana Maria e Renato e aos meus irmãos Samuel e Aninha pelo incentivo durante a realização desse trabalho e por sempre estarem ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre estar ao meu lado, iluminando o meu caminho;

Aos meus pais e irmãos, por sempre estarem ao meu lado, ajudando durante minha trajetória profissional e pessoal, exercendo um papel fundamental para que tudo isso desse certo;

À minha avó, Ana Alves, que mesmo lá do céu, se fez presente todos os dias;

Ao meu orientador Prof. Rodrigo Peroni, por me orientar durante a elaboração desse trabalho, sempre me ajudando com diferentes perspectivas de aplicação;

Por fim, agradeço ao Departamento de Engenharia de Minas da UFRGS e a empresa Anglo American pelo suporte na condução desse trabalho.

RESUMO

As estradas de mineração são constituídas principalmente por vias não pavimentadas. Sua confecção, quando não seguida pelos padrões de qualidade e principais elementos geométricos, podem não suportar o tráfego constante dos equipamentos, além de não garantir a segurança esperada e o melhor desempenho dos equipamentos de produção. A consequência dessas deficiências em função de estrutura frágil, seleção inadequada de materiais e a falta de gerenciamento para sua conservação refletem diretamente na redução da produtividade, desgastes prematuros dos pneus, componentes do caminhão e gasto excessivo e inadequado de recursos de infraestrutura. Uma das formas de analisar indiretamente a qualidade dessas estradas é por meio da coleta de dados que os próprios caminhões fornecem durante o tráfego. A extração desses dados, através de sistema de despacho eletrônico da mina ou de sistema de monitoramento de equipamentos, permite a identificação e direcionamento mais adequado de esforço para manutenção e tratamento dos defeitos. O presente estudo tem como objetivo a investigação de indicadores operacionais que forneçam indícios sobre a qualidade das estradas de mineração. A abordagem sugerida nesse trabalho, compreende a análise de velocidades ao longo dos principais acessos da mina e leituras de variação na pressão na suspensão dos caminhões para identificação de defeitos nas pistas de rolagem. Para alcançar o objetivo do problema em questão, a metodologia aplicada consistiu em coletar o perfil de transporte desses acessos, cálculo da velocidade nas condições atuais e posteriormente propor melhorias nos segmentos que apresentam falhas. Uma coleta de registros da pressão nas suspensões dos caminhões também foi feita com intuito de localizar os principais defeitos em estradas de mineração. Os parâmetros coletados demonstraram uma relação direta com os pontos críticos identificados em campo através de inspeções visuais, validando os indicadores selecionados como parâmetros indiretos para análise de desempenho e direcionamentos de manutenção em estradas.

Palavras-chaves: Estrada de mineração, projetos de estradas, sistema de monitoramento de equipamentos

ABSTRACT

Mining roads consist mainly of unpaved roads. Its built, when not followed by quality standards and main geometric elements, may not withstand the constant traffic of the equipment, in addition to not guaranteeing the expected safety and the best performance of the production equipment. The consequence of these deficiencies due to the fragile structure, inadequate selection of materials, absence of compaction and the lack of management for their conservation, directly reflect on productivity, premature wear of tires and truck components and excessive expenses of infrastructure resources. One way to indirectly analyze the quality of these roads is by collecting data that the trucks themselves provide as they pass over the roads. The extraction of this data through the electronic dispatch system of the mine or the equipment monitoring system, allows the identification and more appropriate direction of effort for maintenance and treatment of defects. The present study aims to investigate operational indicators that provide evidence on the quality of mining roads. The approach suggested in this work, include the analysis of speeds along the main accesses of the mine, readings of variation in the pressure in the truck's suspension to identify defects in the roads. In order to achieve the objective, the applied methodology consisted of collecting the transport profile of these accesses, simulating the speed in the current conditions and subsequently proposing improvements in the failing segments. A data collection of the pressure in the truck suspensions was also made in order to identify the main defects in mining roads. The collected parameters demonstrated a direct relationship with the critical points identified in the field through visual inspections, validating the selected indicators as indirect parameters for performance analysis and road maintenance directions.

Keywords: Mining road, road design, equipment monitoring system

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre largura de estrada e número de vias com dimensões em metros para um caminhão de 4m de largura.....	23
Figura 2 - Seção de uma via com berma de segurança na lateral	23
Figura 3 - Superlargura em estrada de transporte em curva.....	24
Figura 4 - Exemplo de raio de curvatura impactando na performance do caminhão e estrada	26
Figura 5 - Diagrama de distância de vista para curvas verticais (a) e horizontais (b).....	28
Figura 6 - Variação em declividade de rampa	30
Figura 7 - Relação entre grade e ciclo de transporte	30
Figura 8 - Declividade incorreta (não uniforme) e correto (uniforme)	31
Figura 9 - Deformação plástica permanente nas camadas de uma estrada	32
Figura 10 - Exemplo de Curvas CBR	34
Figura 11 - Comparação entre o método CBR e mecanístico usando carga na roda de 104 toneladas métricas.	36
Figura 12 - Variação de valores ótimo e sub-ótimo para produto de contração e coeficiente de granulometria para materiais usados na superfície da estrada	40
Figura 13 - Desempenho do caminhão x Resistência ao rolamento	43
Figura 14 - Relação entre custo operacional do veículo e manutenção de estrada em função da frequência de manutenção e resistência ao rolamento	44
Figura 15 - Ficha de avaliação de estrada de mina.....	46
Figura 16 - Avaliação de resistência ao rolamento em revestimentos de estradas... ..	47
Figura 17 - Interface para monitoramento em tempo real de um caminhão Komatsu 830E-AC.....	50
Figura 18 - Desenvolvimento e integração de Sistema de manutenção de estrada em tempo real com comunicação, locação e monitoramento existente	52
Figura 19 - Fluxograma de análise de defeitos em estrada por meio de velocidade dos caminhões	54
Figura 20 - Imagem de satélite da Mina do Sapo – Projeto Minas Rio.....	55
Figura 21 - Estradas permanentes selecionadas para avaliação	56
Figura 22 - Perfil da estrada (Pontos a cada 50m) permanente Step 3 (a), Fase 4 (b) Britador (c).....	58

Figura 23 - Curva de performance para caminhão Komatsu 830E-AC Desempenho aceleração (a) Desempenho retardo (b)	61
Figura 24 - Desempenho real dos caminhões carregados e descarregados na estrada da Fase 4	62
Figura 25 - Desempenho real dos caminhões carregados e descarregados na estrada do Step 3	63
Figura 26 - Desempenho real dos caminhões carregados e descarregados na estrada do Britador.....	63
Figura 27 - Perfil real (linha vermelha) e ajustado (linha verde) da Fase 4	64
Figura 28 - Perfil real (linha vermelha) e ajustado (linha verde) da estrada do Step 3	64
Figura 29 - Perfil real (linha vermelha) e ajustado (linha verde) da estrada do Britador	64
Figura 30 - Perfil de velocidade do trecho estudado para variação da inclinação.....	66
Figura 31 - Defeitos (deformações) nas estradas durante inspeção visual caminhão carregado (a) caminhão descarregado (b)	67
Figura 32 - Situação da resistência ao rolamento das estradas.....	71
Figura 33 - Perfil de velocidade simulado para as vias atuais da estrada da Step 3 Carregado (a) Descarregado (b)	72
Figura 34 - Perfil de velocidade simulado para as vias atuais da estrada da Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)	73
Figura 35 - Perfil de velocidade simulado para as vias atuais da estrada do Britador (a) Carregado (b) Descarregado	75
Figura 36 - Comparativo da curva de velocidade teórica com os dados de campo da estrada da Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)	76
Figura 37 - Comparativo da curva de velocidade teórica com os dados de campo da estrada Step 3 Carregado (a) Descarregado (b)	77
Figura 38 - Comparativo da curva de velocidade teórica com os dados de campo da estrada do Britador Carregado (a) Descarregado (b).....	78
Figura 39 - Perfil de velocidade ajustado para a estrada do Step 3 Carregado (a) Descarregado (b)	80
Figura 40 - Perfil de velocidade ajustado para a estrada do Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)	82

Figura 41 - Perfil de velocidade ajustado para a estrada Britador Carregado (a) Descarregado (b)	84
Figura 42 - Comparativo de Velocidade Carregado (a) Descarregado (b) e tempo de deslocamento do caminhão na estrada Carregado (c) Descarregado (d) para a estrada do Step 3	86
Figura 43 - Perfil de velocidade para variação de resistência ao rolamento da estrada do Step 3 Carregado (a) Descarregado (b)	87
Figura 44 - Comparativo de Velocidade Carregado (a) Descarregado (b) e tempo de deslocamento do caminhão na estrada Carregado (c) Descarregado (d) para a estrada da Fase 4	88
Figura 45 - Perfil de velocidade para variação de resistência ao rolamento da estrada do Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)	89
Figura 46 - Comparativo de Velocidade Carregado (a) Descarregado (b) e tempo de deslocamento do caminhão na estrada Carregado (c) Descarregado (d) para a estrada do Britador	90
Figura 47 - Perfil de velocidade para variação de resistência ao rolamento da estrada da Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)	91
Figura 48 - Perfil da estrada da Fase 4 para diferentes inclinações	92
Figura 49 - Comparativo de velocidade carregado para declividade atual de trecho da estrada da Fase 4 e ajuste de declividade para 9% e 8%	93
Figura 50 - Comparativo de velocidade descarregado para declividade atual de trecho da estrada da Fase 4 e ajuste de declividade para 9% e 8%	93
Figura 51 - Trecho estudado para recorrência de talude e adequação da inclinação da estrada da Fase 4	94
Figura 52 - Seção da topografia existente e proposta de adequação do trecho para declividade de 8% (a) e 9% (b)	94
Figura 53 - Variação da pressão da suspensão ao longo da estrada Step 3 – Caminhão 1003 Descarregado	96
Figura 54 - Variação da pressão da suspensão ao longo da estrada Fase 4 – Caminhão 1003 Descarregado	96
Figura 55 - Variação da pressão da suspensão ao longo da estrada Step 3 – Caminhão 1003 Carregado	97
Figura 56 - Variação da pressão da suspensão ao longo da estrada Fase 4 – Caminhão 1031 Carregado	98

Figura 57 - Variação da pressão da suspensão na estrada Step 3 – Caminhão 1005	
Descarregado.....	106
Figura 58 - Variação da pressão da suspensão na estrada Step 3 – Caminhão 1031	
Descarregado.....	106
Figura 59 - Variação da pressão da suspensão na estrada Fase 4 – Caminhão 1005	
Descarregado.....	107
Figura 60 - Variação da pressão da suspensão na estrada Fase 4 – Caminhão 1031	
Descarregado.....	107
Figura 61 - Variação da pressão da suspensão na estrada Step 3 – Caminhão 1031	
Carregado	108
Figura 62 - Variação da pressão da suspensão na estrada Step 3 – Caminhão 1005	
Carregado	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Superelevação recomendada para curvas horizontais.....	25
Tabela 2 - Sumário de categorias de estradas de transporte.....	33
Tabela 3 - Sumário de categorias de estradas de transporte.....	37
Tabela 4 - Propriedade de materiais recomendados para materiais das estradas de transporte	39
Tabela 5 - Variação da resistência ao rolamento em função do tipo piso	42
Tabela 6 - Avaliações da resistência do rolamento em revestimento.....	45
Tabela 7 - Características geométricas dos acessos	56
Tabela 8 - Defeitos identificados e avaliados nas estradas.....	70
Tabela 9 - Quadro resumo de correção geométrica das estradas - Caminhão Carregado	85
Tabela 10 - Quadro resumo de correção geométrica das estradas - Caminhão Descarregado.....	85
Tabela 11 - Comparativo de velocidade para diferentes inclinações e movimentação necessária para adequar o acesso	94

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO.....	17
1.3 META	18
1.4 OBJETIVOS	18
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2 ESTADO DA ARTE	20
2.1 PROJETO GEOMÉTRICO DE MINA	20
2.1.1 Largura de pista e Bermas de Segurança	22
2.1.2 Superlargura e Superelevação	24
2.1.3 Raio de Curvatura	25
2.1.4 Distância de parada e distância de visibilidade	27
2.1.5 Inclinação de rampa	29
2.2 PROJETO ESTRUTURAL DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	31
2.2.1 Método <i>California Bearing Ratio</i> (CBR)	33
2.2.2 Método Mecanístico	35
2.3 PROJETO FUNCIONAL DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	37
2.3.1 Resistência ao rolamento	40
2.3.2 Sistema de monitoramento de frota	47
2.3.3 Identificação de defeitos em estradas	51
3 METODOLOGIA	54
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL LONGITUDINAL DAS ESTRADAS.....	56
3.2 CONSTRUÇÃO DE MODELO DE DESEMPENHO E AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE TEÓRICA	59
3.2.1 Seleção da curva de <i>rimpull</i> dos caminhões	59
3.2.2 Levantamento da resistência ao rolamento das estradas selecionadas ...	62
3.2.3 Comparação da velocidade praticada nas estradas	62
3.3 CORREÇÕES GEOMÉTRICAS.....	63
3.4 DEFINIÇÃO DE INDICADORES CHAVE PARA DESEMPENHO E AJUSTES NOS PERFIS LONGITUDINAIS DAS ESTRADAS	64
3.4.1 Análise de sensibilidade da variação da resistência ao rolamento	65
3.4.2 Análise de sensibilidade da variação da inclinação da estrada	65

3.5 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO USO DOS REGISTROS DE PRESSÃO DA SUSPENSÃO DOS CAMINHÕES PARA DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS NAS ESTRADAS	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO	69
4.2 CÁLCULO TEÓRICO DA VELOCIDADE ATUAL DAS VIAS	71
4.3 COMPARATIVO DA VELOCIDADE TEÓRICA DAS VIAS E A PRATICADA NA MINA	75
4.4 CORREÇÕES GEOMÉTRICAS	78
4.5 AVALIAÇÃO DE ASPECTOS FUNCIONAIS E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	85
4.5.1 Análise da Variação da resistência ao rolamento	85
4.5.2 Análise da Variação na declividade	91
4.6 RESULTADO DA COLETA E COMPARATIVO DO USO DOS REGISTROS DE PRESSÃO DA SUSPENSÃO DOS CAMINHÕES PARA DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS NAS ESTRADAS	95
5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS	102
ANEXO A – VARIAÇÃO DE PRESSÃO NA SUSPENSÃO DOS CAMINHÕES ...	106

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Estradas não pavimentadas na mineração representam um dos grandes desafios para a operação de uma mina, já que por elas é escoada toda a produção de uma unidade de extração mineral. Essas vias podem apresentar ausência de projetos, problemas na execução das projeções geométricas, deficiência em suas estruturas, revestimentos mal selecionados, compactação com deficiência em suas camadas e a falta de gerenciamento para sua conservação. A presença de defeitos nas estradas ocasionam grandes riscos de segurança aos colaboradores e equipamentos que a utilizam, redução na vida útil dos equipamentos e seus componentes, aumento no custo para manutenção, maior consumo de combustíveis pelos caminhões para vencer a resistência que ela oferece, desgastes prematuros dos pneus e impactos socioambientais (emissões fugitivas) nas comunidades que essas mineradoras estão inseridas.

Thompson (2011) e Visser (2015), refletem que dentro do sistema de transporte em estradas não pavimentadas para caminhões de grande porte, esses possuem um componente vital do processo de produção. A não percepção dos elementos geométricos de uma estrada de mineração gera impactos imediatos na produtividade da mina e que por consequência eleva os custos de produção. Além disso, uma operação segura, produtiva e que permita uma maior longevidade de seus equipamentos estão estritamente relacionados a bons projetos de estrada, bem como na sua construção e manutenção. Thompson (2018) salienta que o transporte representa um dos maiores elementos de custo, especialmente para operações em cavas profundas e extensas. Estimativas mostram que o custo de mineração, entre 50% (Thompson, 2018), podendo alcançar a 80% (Mohutsiwa e Musingwini, 2015), está associado com carregamento e transporte de materiais em tais cavas. Isso se traduz em uma significativa oportunidade de redução de custos através da melhoria dessas estradas de transporte.

A necessidade de construção de uma boa estrada, passa desde um bom projeto geométrico, estabelecimento correto das camadas estrutural e de revestimentos que irão compor essas vias até a implantação de um sistema de gerenciamento de manutenção e controle. Essas etapas proporcionam, durante a vida útil dessas estradas, benefícios em diversos aspectos na operação, manutenção, produção e socioambientais.

A iniciativa de redução de custo nas operações mineiras vem utilizando ao longo do tempo a inovação tecnológica para promover a viabilidade dos projetos. Partindo dessa inovação, e se tratando de gerenciamento de estradas, Thompson *et al* (2003) contemplam em seus estudos que a abordagem mais econômica para o gerenciamento de manutenção de redes de estradas de mineração é baseada em um sistema em tempo real que integra dados de interação de caminhões e pavimentos como base para tomar decisões no que se refere ao gerenciamento. Alinhado ao sistema de gerenciamento de manutenção, a maioria das grandes minas no país podem se beneficiar da vasta rede de coleta de dados ao longo das diversas fases do processo produtivo.

Na mina, os dados coletados durante a operação dos caminhões se mostram uma importante base de dados para estudo e análises. A identificação de defeitos em estradas associados com o posicionamento geográfico dos equipamentos, à medida que eles se deslocam pelas vias, demonstra ser uma importante solução para compor o gerenciamento de manutenção das estradas. Logo estudos que permitam a análise e direcionamento de recursos para promover a diminuição de custos é algo de interesse ao setor.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Nas empresas de mineração, especialmente aquelas que possuem uma extensa e complexa rede de transporte, o monitoramento de defeitos em estradas representa um desafio para as equipes de planejamento e infraestrutura. Conforme ocorre a deterioração dessas estradas não pavimentadas, o tempo necessário para identificação e tomada de decisão para aplicação da melhor técnica de manutenção das vias são muitas vezes inadequados. Impactos significativos podem ser

observados no tempo de ciclo dos caminhões, que precisam reduzir sua velocidade ou até mesmo desviar da rota planejada para não gerar acidentes.

Para monitorar todos os pontos das estradas, seria necessário um longo tempo para uma análise correta detalhada, identificando a localização e severidade dos problemas. Da mesma forma, a falta de uma análise aprofundada pode permitir o direcionamento e a alocação de recursos de manutenção das estradas com problemas, mas que estão localizadas em áreas de pouca movimentação, ou que possuem baixo impacto nas operações, gerando custos excessivos de infraestrutura. Além disso, até que a correta atuação ocorra, consumo de combustível, vida útil de equipamentos, componentes e pneus continuam gerando impacto negativo no custo final da operação.

Através da implantação de sistemas de gerenciamento de equipamentos móveis (ou sistemas de despacho) as mineradoras coletam dados de diversos equipamentos e que muitas vezes não são utilizados para seu próprio benefício. Diante disso, se faz necessário o estudo para avaliar a utilização desses dados que podem ser relevantes para identificação dos defeitos nas estradas.

1.2 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO

A disponibilidade de grande quantidade de dados, seja pelo sistema de monitoramento do caminhão, seja pelo sistema de otimização de produção da mina, são uma fonte importante para construção de modelos de predição de defeitos nas estradas. Esses modelos podem auxiliar no melhor direcionamento dos recursos de infraestrutura de mina, entendimento dos eventos que estão ocasionando os defeitos e possibilitando a aplicação de um gerenciamento de manutenção das estradas mais efetivo.

Quando um caminhão se desloca da frente de produção até o seu destino, esse não está apenas transportando o minério ou estéril, ele está coletando dados em tempo real por meio de sensores instalados e enviando para a central de controle informações sobre a condição de sua estrutura e componentes. Parte desses dados coletados podem ser associados à posição geográfica e serem correlacionados às

condições de trafegabilidade nas vias. Com essa percepção, o estudo pretende fazer uso desses monitoramentos para predizer problemas nas estradas da mina.

1.3 META

A meta desse estudo é identificar a presença de defeitos em estradas não pavimentadas, através da análise dos registros de velocidade dos caminhões e da resposta da variação de carga nas suspensões dos caminhões coletados pelo sistema de despacho eletrônico da mina.

1.4 OBJETIVOS

Para alcançar essa meta, durante o desenvolvimento desse estudo, os principais objetivos deverão ser alcançados:

- i. Analisar e modelar a velocidade teórica dos caminhões fora de estrada durante seu deslocamento carregados e descarregados de forma a indicar locais ou regiões com problemas geométricos;
- ii. Analisar melhoria nas estradas para ganho de tempo de ciclo e redução de desgaste de pneus e componentes;
- iii. Analisar indicadores operacionais que forneçam indícios sobre a qualidade das estradas de mineração

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, incluindo este que descreve a introdução ao tema que levou ao desenvolvimento do estudo da avaliação de defeitos de estradas utilizando indicadores e leituras dos caminhões fora de estrada. Fazem parte também a contextualização do problema, justificativa da dissertação, meta, objetivos e estruturação do trabalho.

Os demais capítulos abordam os conteúdos conforme descrito a seguir:

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica do estado da arte que fundamentaram a dissertação, bem como a justificativa da utilização de técnicas para avaliar e modelar mapas de indicadores de defeitos nas estruturas, revestimentos e geometria das estradas.

Capítulo 3 – Metodologia utilizada na pesquisa, sistemática de coleta e tratamento dos dados dos caminhões, divididas em levantamento de dados para estudos de defeitos geométricos e estudos de defeitos estruturais e/ou de revestimento.

Capítulo 4 – Análise dos dados e dos resultados, bem como as observações verificadas e testadas em campo para cada parâmetro estudado.

Capítulo 5 – Conclusões, recomendações futuras e as referências bibliográficas utilizadas no estudo.

Capítulo 2

ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentado uma breve revisão bibliográfica dos principais conceitos e técnicas utilizados e que suportam o estudo desenvolvido. Assim, na seção 2.1 são abordados conceitos e padrões para formulação de projetos geométricos de mina. Na seção 2.2 a técnicas de dimensionamento para construção de projetos estruturais de estradas não pavimentadas. Por fim a seção 2.3 refere-se aos projetos estruturais, bem como em sistema de monitoramento e formas de identificação da qualidade da camada de revestimento.

2.1 PROJETO GEOMÉTRICO DE MINA

Uma estrada de transporte construída deve permitir que os equipamentos, que por ela trafegam, desempenhem sua função de forma segura e eficiente. É nessa etapa o ponto de partida para definição dos traçados e construção de vias na mina afim de permitir a movimentação segura dos veículos. Para se ter um projeto geométrico de estrada, deve-se considerar os principais elementos geométricos que permitam o bom desempenho dos caminhões, tais como: Raio de curvatura, inclinação, declive, inclinação de rampas, superelevação, distância de parada, distância de vista, traçado de junções, bermas, largura de estrada. Em Elam; Teaster Jr; Lawless (1999), Brasil (2016) e Australia (2017) é possível encontrar especificações e normas para estes principais elementos.

Em um levantamento realizado por Thompson (2009), cerca de metade dos acidentes nas estradas de mina surgem de deficiências de projeto centrado em fatores funcionais como poeira, baixa visibilidade, resistência ao deslizamento, presença de blocos nas estradas ou nos leitos. Tratando-se de elementos geométricos, os traçados de junções inapropriadas, falta ou inadequação de bermas de segurança são os mais frequentes citados como fatores de risco em segurança.

Nesse levantamento o autor, Thompson (2009), descreve que:

- Entender como uma estrada é projetada, a interação entre um bom projeto, segurança e eficiência de custo de transporte são fatores-chave para a eliminação de defeitos que possam colocar em risco os colaboradores e a produção;
- Projetos de estradas bem feitos, observando as características da mina, permitem uma melhor previsão de falhas e uma resposta mais efetiva para controlar e tratá-las;
- Se um componente do projeto é deficiente, os outros componentes não trabalharão no seu máximo potencial e a performance e segurança da estrada serão frequentemente comprometidas;
- Nenhuma quantidade de manutenção cobrirá os problemas relacionados a uma estrada mal projetada.

Thompson *et al.* (1998) e Thompson (2009), na África do Sul, observaram em relatórios de acidentes com caminhões desde 1996, e constataram que na maioria dos relatórios de acidentes analisados, pouca atenção ou reconhecimento foi dado aos componentes básicos do projeto de estradas, mesmo no qual a condição deficiente que levou diretamente para o acidente estava claramente indicado.

No estudo conduzido, Thompson *et al.* (1998) e Thompson (2009) reportam que do total dos acidentes analisados e categorizados, cerca de 50% poderia ser diretamente atribuído a projetos de estradas e operação. Desses, 60% foram relacionados a atos não padronizados incluindo erro humano e dos demais 40%, associados com fatores de projeto da estrada, componentes geométricos e funcionais predominantemente. Destaca-se também que esses 25% de acidentes no qual erro humano estava implicado foram, também, associados com deficiências no projeto das estradas.

Para evitar um acidente ou reduzir a gravidade de suas consequências, assim como reduzir impacto nas estradas, os elementos geométricos de uma via devem ser projetados de forma a considerar e adaptar aos erros mais frequentemente vistos durante a operação.

2.1.1 Largura de pista e Bermas de Segurança

Tannant e Regensburg (2001) nos diz que a largura de estrada de transporte tanto em linha reta ou em curvas devem ser adequadas para permitir as manobras seguras do veículo e manter a continuidade da estrada. Os autores observam, também, que estradas muito estreitas podem reduzir drasticamente a vida útil dos pneus ao forçar o operador a passar na borda da berma ou do talude ao cruzar com outro veículo. Isto resulta em danos nas laterais, desgastes desiguais e cortes prematuros nos pneus.

As estradas para tráfego de equipamentos de transporte na mineração no Brasil são, em sua maioria, construídas seguindo as legislações brasileiras definidas na norma regulamentadora aprovada pelo Ministério do Trabalho do Brasil. Conforme a NR-22 Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração (BRASIL, 2016) “[...] a largura mínima das vias de trânsito, deve ser duas vezes maior que a largura do maior veículo utilizado, no caso de pista simples, e três vezes, para pistas duplas [...]”.

Em um estudo realizado por Reis (2014) e comumente visto em minas de grande porte e com grande volume de equipamento, optam-se por utilizar a proposta de Collins; Fytas; Singhal (1987), também observada em Elam; Teaster Jr; Lawless (1999), onde a largura de pista para estrada de mineração pode ser expressa através da equação 1 e ilustrado pela Figura 1:

$$L = (1,5 \times V + 0,5) * X \quad (1)$$

Fonte: Adaptado de Tannant e Regensburg (2001)

Sendo:

L = largura da via (m)

V = número de vias

X = largura do maior equipamento que passa pela via (m)

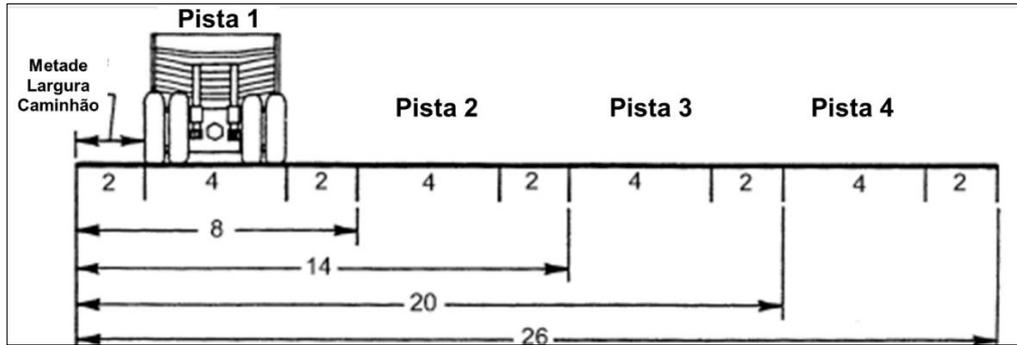


Figura 1 - Relação entre largura de estrada e número de vias com dimensões em metros para um caminhão de 4m de largura.

Fonte: Adaptado de Tannant e Regensburg (2001)

Já as bermas de segurança são estruturas construídas com material da mina e usadas para manter um veículo fora de controle dentro da estrada ou evitar riscos de quedas no talude. São geralmente construídas nas laterais das vias e muitas vezes encontradas delimitando duas ou mais vias (bermas de segurança central). Com relação as bermas de segurança, a NR-22 Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração (BRASIL, 2016) nos diz que “[...] nas laterais das bancadas ou estradas onde houver riscos de quedas de veículos devem ser construídas bermas de segurança (Figura 2) com altura mínima correspondente à metade do diâmetro do maior pneu de veículo que por elas trafegue”. No entanto, na prática tem se mostrado que a utilização de dois terços da altura do maior caminhão proporciona melhores resultados. A largura da berma varia em função do ângulo de repouso do material e é definido pela equação 2.

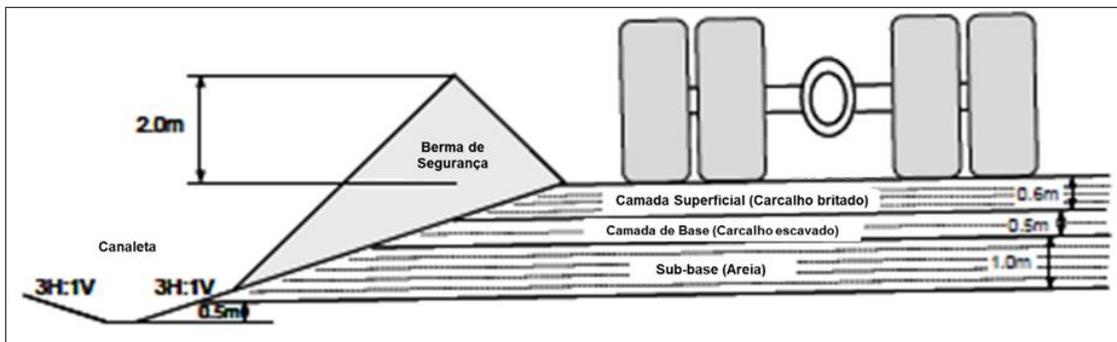


Figura 2 - Seção de uma via com berma de segurança na lateral

Fonte: Adaptado de Tannant e Regensburg (2001)

$$L = 2 \times \left(\frac{\frac{2}{3}(h)}{\tan(\alpha)} \right) \quad (2)$$

Sendo:

L= Largura da berma (m)

h = tamanho do pneu do maior caminhão (m)

α = ângulo de repouso do material

2.1.2 Superlargura e Superelevação

A superlargura consiste em alargar as vias de transporte em locais com presença de curvas. Uma largura extra (Figura 3) nessas regiões é necessária devido a curvatura feita pelo caminhão e é calculado através da equação 3.

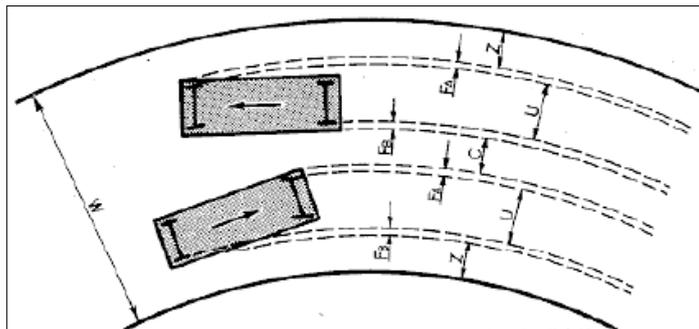


Figura 3 - Superlargura em estrada de transporte em curva
Fonte: Kaufman e Ault (1977)

$$S = n \times \left(R - \sqrt{R^2 - E^2} \right) + \frac{V}{10\sqrt{R}} \quad (3)$$

Fonte: Adaptado de Visser (2013)

Sendo:

S = superlargura (m)

n = número de pistas

R = raio de curvatura (m)

E = distância entre eixos mais afastados (m)

V = velocidade diretriz (km/h)

A superelevação em curvas é necessária para reduzir a força centrífuga nos caminhões quando estes estão fazendo curvas. É aconselhado que a superelevação

seja projetada quando houver curvas nas estradas. No entanto, a superelevação excessiva deve ser evitada, uma vez que os caminhões em condições de chuva ou excesso de água podem deslizar para dentro da curva, causando possível tombamento. (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013 apud¹ WINKLE, 1976a, b).

Além disso, curvas superdimensionadas resultam em peso e desgaste nos pneus internos, flexão na estrutura, erosão na superfície de rolagem durante eventos de chuva além de maior demanda de manutenção da via. Na Tabela 1, são observados os valores de superelevação comumente utilizados em função do raio de curvatura e velocidade permitida na estrada.

Tabela 1 - Superelevação recomendada para curvas horizontais

Raio de Curvatura (m)	Velocidade do veículo (km/h)				
	24	32	40	48	>56
15	4%				
30	4%	4%			
45	4%	4%	5%		
75	4%	4%	4%	6%	
90	4%	4%	4%	5%	6%
180	4%	4%	4%	4%	5%
300	4%	4%	4%	4%	4%

Fonte: Adaptado de Kaufman e Ault (1977)

2.1.3 Raio de Curvatura

As estradas de transporte devem possuir velocidades constantes ao longo do trecho, a fim de permitir o melhor desempenho do caminhão. Nessas estradas, quando houver curvas, estas devem ser dimensionadas a fim de permitir velocidades elevadas sem afetar a segurança e que reduzam congestionamentos no tráfego. Hustrulid; Kuchta; Martin (2013), citam que, em curvas mais fechadas, o custo e segurança de transporte deverá ser analisado, pois terão impactos no ciclo de equipamento, reduzindo produção, aumentando os riscos na operação e desgaste

¹ Winkle, R.F. 1976a. Development and maintenance of haul roads in open pit mines. Paper presented at the AIME Annual Meeting Las Vegas, Nevada, Feb. 22–26, 1976. Preprint No. 76-AO-5.

Winkle, R.F. 1976b. Guides to design and control of efficient truck and shovel operations in open-pit mines. M.S. Thesis, Univ. of Arizona

da estrada e do caminhão. Tannant e Regensburg (2001) exemplificam que para construir uma estrada em torno de um terreno montanhoso, o projetista deverá pesar o custo de escavação da rocha para um raio de curvatura maior, que permita uma velocidade de 40 km/h, contra uma curva mais fechada ou um “switchback” (Figura 4) com escavação mínima de rocha mas que demandará uma redução da velocidade do veículo para 20 km/h, aumentando assim o tempo de ciclo e penalizando a produtividade durante a vida útil daquela estrada. Em Reis (2014), na mina em estudo, a premissa é a utilização de raios de curvaturas maiores possíveis, permitindo aumento de velocidade nesses trechos e consequentemente na melhoria do ciclo de transporte e ganho de produtividade.



Figura 4 - Exemplo de raio de curvatura impactando na performance do caminhão e estrada
Fonte: Adaptado de Holman (2006)

O raio de curvatura pode ser calculado por meio da equação 4, que considera a velocidade do caminhão, atrito na superfície e a superelevação

$$R = \frac{v^2}{127(e+f)} \quad (4)$$

Fonte: Adaptado de Kaufman e Ault (1977)

Sendo:

R = raio de curvatura (m)

V = velocidade do veículo (km/h)

e = superelevação (m/m)

f = coeficiente de atrito entre os pneus e a superfície da estrada

2.1.4 Distância de parada e distância de visibilidade

A distância de parada e de visibilidade são dois componentes importantes de segurança e que devem ser considerados durante o projeto geométrico de uma estrada. A distância de parada pode ser traduzida como a distância percorrida pelo veículo para, uma vez notado um obstáculo ou risco, haver condição de efetivamente parar sem colidir com o elemento de risco. Essa distância pode ser calculada pela equação 5.

$$SD = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \cdot \sin\theta + V_o \cdot t + \left[\frac{g \cdot t \cdot \sin\theta + V_o}{2 \cdot g (U_{min} - \sin\theta)} \right]^2 \quad (5)$$

Fonte: Tannant e Regensburg (2001)

Sendo:

SD = Distância de parada (m)

g = Aceleração da gravidade (9,8m/s²)

t = Tempo decorrido entre a percepção do operador da necessidade de parar e o tempo de fato para acionar o freio (s)

θ = Ângulo de inclinação da estrada (graus)

U_{min} = Coeficiente de atrito do pneu com a estrada

V_o = Velocidade no tempo da percepção (m/s)

Já para a distância de visibilidade (Figura 5), a via deverá oferecer condições ao operador dos veículos de enxergar um objeto a sua frente. Segundo Kaufman e Ault (1977) a distância de visão é definida como "a extensão da área periférica visível para o operador do veículo". É importante que a distância de visão seja suficiente para permitir que um veículo, que viaja a uma determinada velocidade pare antes de atingir um objeto. Essa distância pode ser calculada pelas equações 6 e 7.

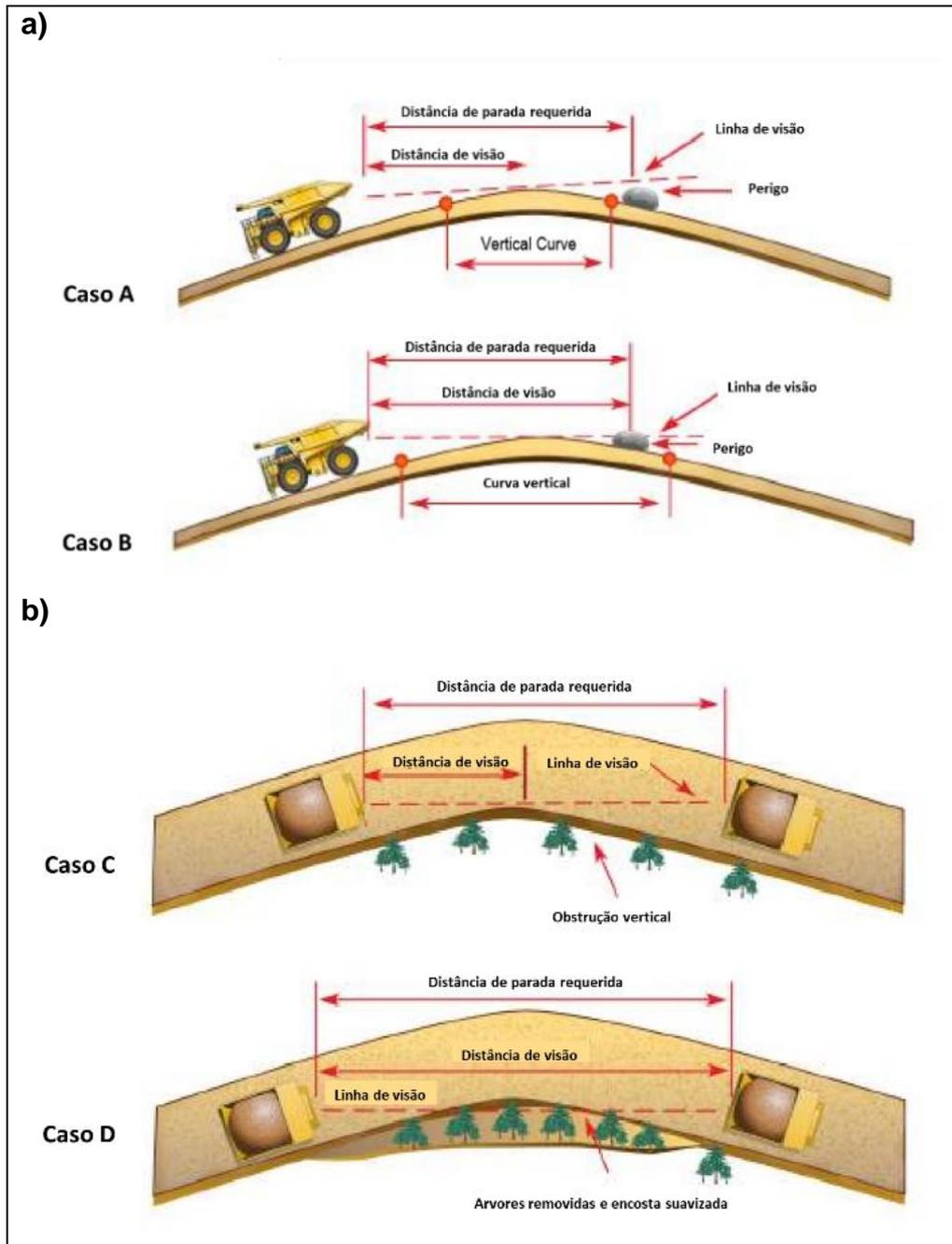


Figura 5 - Diagrama de distância de vista para curvas verticais (a) e horizontais (b)
 Fonte: Adaptado de Holman (2006)

Quando a distância de parada é maior que o comprimento vertical da curva:

$$L = \frac{2S - 200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A} \quad (6)$$

Quando a distância de parada é menor que o comprimento vertical da curva:

$$L = \frac{AS^2}{100(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2} \quad (7)$$

Fonte: Kaufman e Ault (1977)

Sendo:

L = Comprimento da curva vertical (m)

S = Distância de parada do veículo (m)

A = Diferença algébrica em grade (%)

h1 = Altura de visão do operador acima do terreno (m)

h2 = Altura do objeto acima da superfície (m)

2.1.5 Inclinação de rampa

Um fator que influencia consideravelmente na performance do caminhão ao longo de uma estrada de mineração, principalmente aquela no qual encontramos muitas rampas para acessar diversas frentes, é a escolha correta da inclinação da rampa. O ciclo de transporte do caminhão é um indicador de desempenho básico para determinar uma inclinação ótima, sendo o tempo de ciclo um indicador direto da produtividade (AUSTRALIA GOVERNMENT, 2010; COLLINS; FYTAS; SINGHAL, 1987; HOLMAN, 2006; TANNANT E REGENSBURG, 2001). Paralelo a isso, estudos de perda de minério ou uma maior relação estéril minério deverá ser considerada para determinar a melhor inclinação de rampas.

Em Australia Government (2010) e reforçado em Rodvalho; Lima e Tomi (2016) mostram que as condições da estrada e utilização de rotas favoráveis para os caminhões são fatores que afetam a eficiência energética. Pellissari (2019) explica em seus estudos que uma declividade constante da via, ilustrada pela Figura 6, é essencial para evitar a troca desnecessárias de marchas, mantendo assim a velocidades constantes ao longo do deslocamento do caminhão e reduzindo consumo de combustível.

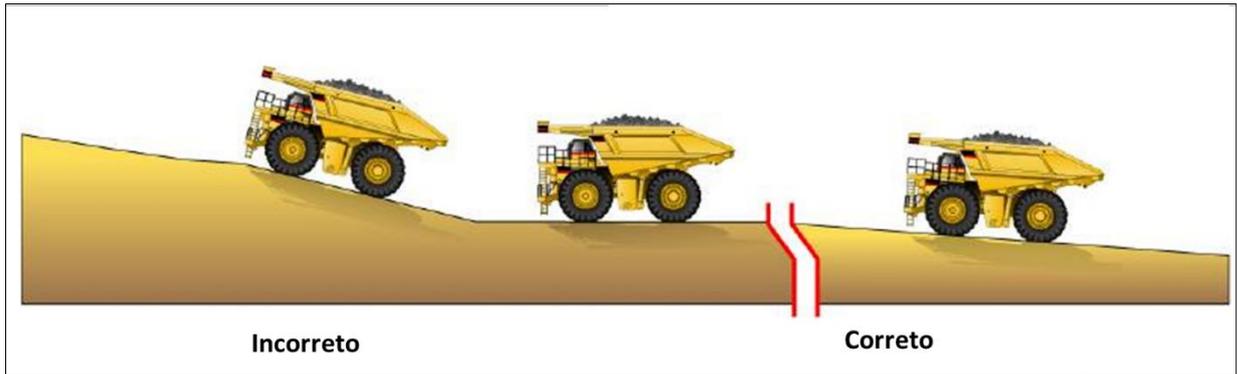


Figura 6 - Variação em declividade de rampa
 Fonte: Adaptado de Holman (2006)

A determinação da declividade ótima para as estradas pode ser feita através da avaliação do tempo de ciclo de transporte do caminhão. A Figura 7 apresenta diferentes inclinações nas vias, variando de 2% a 16%, considerando o caminhão carregado, variando de 340 a 408 t. Através dessa avaliação, Holman (2016) demonstra o impacto da variação da declividade e relação ao tempo de ciclo de transporte de caminhões. O autor apresenta que os caminhões de grande porte desempenham melhor em declividades de 9% a 12%. Para declividades menores, para uma mesma rampa, seria necessário aumentar sua extensão, o que demandaria um maior tempo de transporte. Para declividades maiores, apesar da redução no comprimento da rampa, o caminhão precisaria desprender maior potência, o que exigiria maiores custos operacionais.

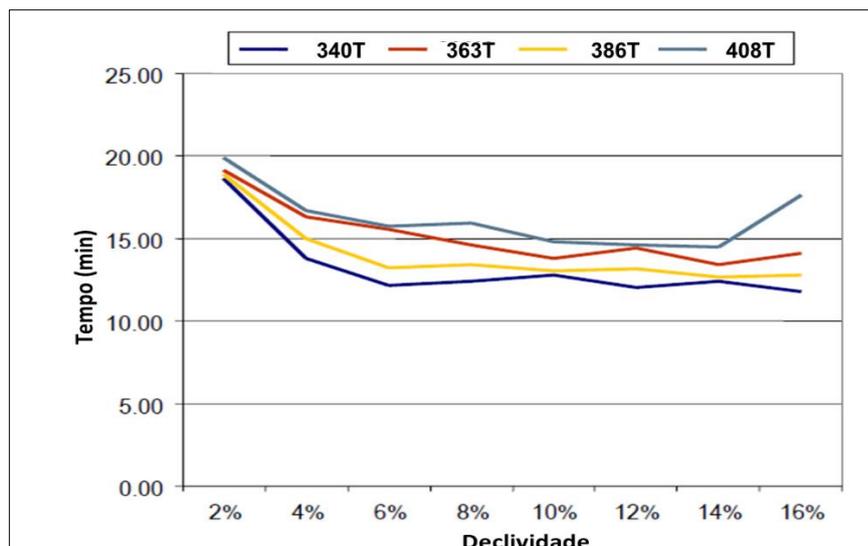


Figura 7 - Relação entre grade e ciclo de transporte
 Fonte: Adaptado de Holman (2006)

Visser (2015) exemplifica o impacto de estradas com variações de gradiente (Figura 8) ao longo do percurso e o que isso pode causar, tanto na via, quanto ao caminhão:

A cada mudança no gradiente da estrada, que pode variar de 8% a 13%, o caminhão tem que mudar de marcha e, sob carga, isso sobrecarrega o trem de força. Cada vez que o conversor de torque é acionado, as rodas giram momentaneamente e causam danos à superfície da estrada. Como todo o caminhão mudará de marcha na mesma área, há um problema de manutenção perpétuo que não pode ser resolvido sem que seja feita a correção da geometria.

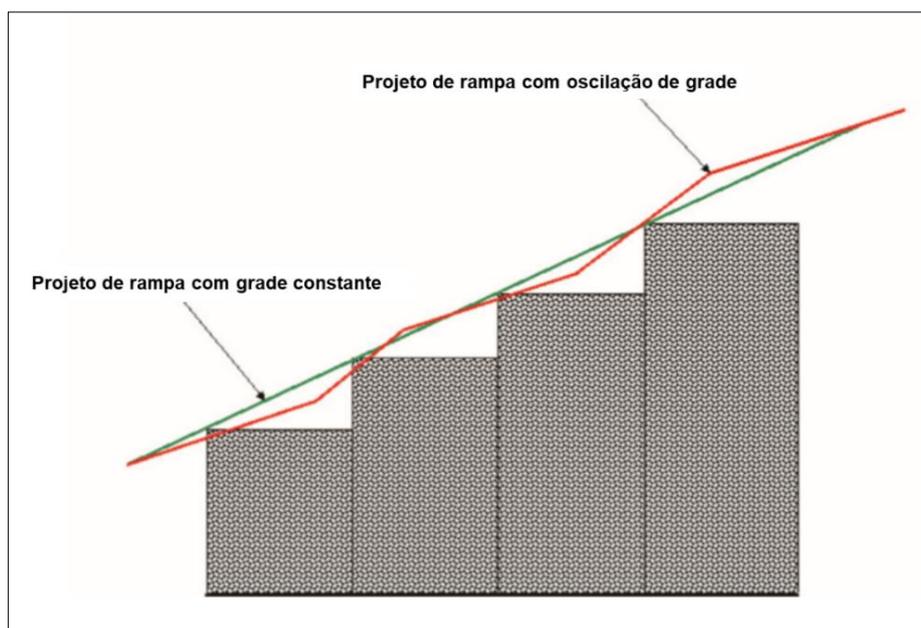


Figura 8 - Declividade incorreta (não uniforme) e correto (uniforme)
Fonte: Adaptado de Visser (2015)

2.2 PROJETO ESTRUTURAL DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Thompson e Visser (2006a) e Thompson (2009; 2011) definem que o objetivo de um projeto estrutural é fornecer uma estrada de transporte que possa suportar as cargas impostas ao longo do tempo de vida da estrada sem a necessidade de manutenções excessivas, causadas por deformações permanentes de uma ou mais camadas na estrada ou do próprio subleito. Bezerra (2004) acrescenta que o dimensionamento de um pavimento tem como objetivo calcular e/ou verificar espessuras e compatibilizar os materiais de forma que a vida útil dele corresponda a um certo número projetado de solicitações de carga. A Figura 9 apresenta a deformação plástica das estradas devido falha no dimensionamento do pavimento.

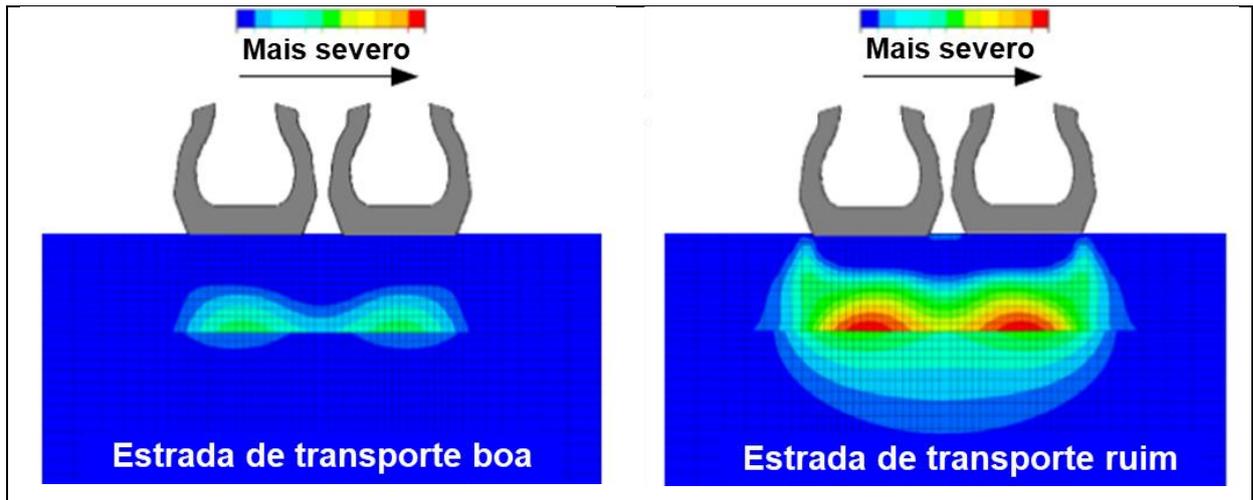


Figura 9 - Deformação plástica permanente nas camadas de uma estrada
 Fonte: Adaptado de Holman (2006)

Nos projetos estruturais, dimensiona-se as camadas de sustentação de tal forma que elas não se deformem ou rompam devido as cargas impostas durante o trânsito dos equipamentos. Sendo a construção dessas camadas, geralmente feitas com materiais disponíveis na própria mina.

Filho (2010), Sousa (2011) e Tannant e Regensburg (2001) dividem estas camadas de um projeto estrutural de uma estrada como:

- Sub-leito – Consiste em solo ou rocha *in-situ* ou outra superfície existente sobre a qual uma estrada será construída;
- Sub-base – É a camada de uma estrada de transporte entre o sub-leito e a base. Geralmente consiste em material granular compactado, cimentado ou não tratado. Além de fornecer resistência estrutural à estrada, ela serve, por exemplo, para evitar a intrusão de solo na camada de base (normalmente essa camada é incorporada à base em estradas de mineração);
- Base – É a camada com principal fonte de resistência estrutural da estrada. Sua função é distribuir e suportar as tensões provocadas pelos pneus nas camadas de revestimento, protegendo o subleito de deformações permanentes;
- Revestimento – A camada superior da estrada de transporte que entra diretamente em contato com os pneus. Geralmente construída com cascalho de até 40mm de diâmetro e uma quantidade máxima de finos de 20%, com

classificação rigorosamente controlada, para evitar problemas de poeira quando seco e deslizamento quando molhado. Proporciona uma superfície de condução suave, também distribui a carga em uma área maior, reduzindo assim as tensões experimentadas pela base.

Em se tratando de mineração, uma estrada poderá ter uma vida útil de meses ou de permanência até a exaustão da cava. Portanto, antes da determinação das espessuras das camadas da estrada, precisa-se entender o caráter de permanência e a criticidade dessa estrada nas atividades em que ela está inserida. Uma forma de categorizar as estradas de mina foi proposto por Visser (2015) conforme Tabela 2 abaixo, que relaciona o volume diário transportado e tempo de permanência da via. Uma forma de determinar se as camadas do projeto estrutural suportam os esforços que a elas serão aplicadas por meio do método *California Bearing Ratio* (CBR) ou método Mecanístico.

Tabela 2 - Sumário de categorias de estradas de transporte

Categoria de estrada de transporte	Volume de tráfego diário (kt)	Descrição
Categoria 1	>25	Estradas principais permanentes de alto volume. Vida operacional pelo menos 20 anos.
Categoria 2	8-24	Estradas semipermanentes, dentro e fora do pit, estradas de transporte em rocha <i>in situ</i> , volumes médios de tráfego. Vida operacional abaixo dos 10 anos.
Categoria 3	<7	Estradas transitórias dentro e fora da mina, baixos volumes de tráfego. Vida operacional inferior a 3 anos.

Fonte: Adaptado de Visser (2015) apud² Thompson e Visser (2002)

2.2.1 Método *California Bearing Ratio* (CBR)

Kumar (2000) e Tannant e Regensburg (2001) definem o método CBR como uma abordagem que caracteriza a capacidade de suporte de um dado solo como um percentual da capacidade de suporte de uma rocha padrão, a proporção dessa capacidade é referida como o índice CBR para aquele solo. Curvas empíricas, conhecidas como curvas de CBR, relacionam a espessura de preenchimento

² THOMPSON, R.J. and VISSER, A.T. 2002. An integrated haul road design system to reduce cost per tonne hauled. Proceedings of World Mining Equipment Haulage 2002, Tucson, AZ, 19–22 May 2002.

requerida e a carga da roda aplicada para o valor de CBR do material. A aplicação do método de CBR pode ser feita a partir de um ábaco, conforme apresentado na Figura 10, contendo curvas com os valores de CBR dos materiais ensaiados contra a espessura da camada para vários carregamentos de roda (SOUSA, 2011).

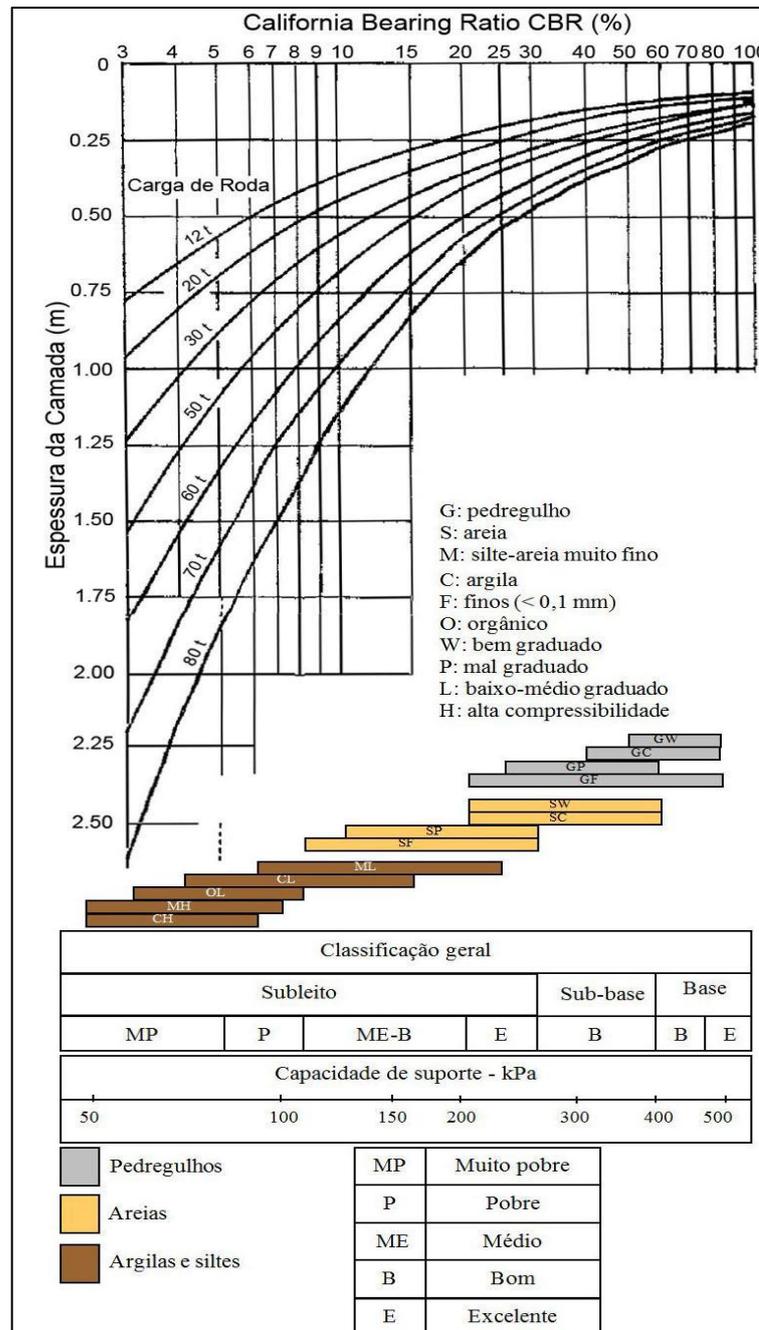


Figura 10 - Exemplo de Curvas CBR
Fonte: Sousa (2011)

Quando calculada a carga aplicada ao solo por pneu, Kaufman e Ault (1977) sugerem que seja aplicado um fator adicional de 20% sobre o valor quando o eixo

possui duas rodas em cada lado, isso devido a superposição de forças aplicado ao solo. Thompson e Visser (1996); Vieira (2013) apud³ Thompson (2009), no entanto chamam atenção para limitações desse método devido a ele assumir um módulo de elasticidade constante para os materiais e o método ter sido baseado em resultados empíricos de estradas públicas sujeitas a no máximo 80kN de carga por eixo. Extrapolar o uso desse método em estradas de mineração pode levar a erros de dimensionamento das espessuras das camadas.

2.2.2 Método Mecanístico

Um método de dimensionamento é dito mecanístico quando utiliza uma teoria para prever as tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima na estrutura do pavimento, e procura compatibilizá-las com as tensões resistentes dos materiais (BEZERRA, 2004). A abordagem mecanicista da engenharia de pavimentos envolve o cálculo de tensões, deformações e de deflexões no pavimento com base na extensão da teoria de camada única de Boussineq para múltiplas camadas (Figura 11). A abordagem adotada para uma análise e projeto mecanicista abrange a previsão do comportamento do material antes da construção por meio de testes apropriados de laboratório e de campo. A resposta de um pavimento a uma carga aplicada é simulada e as tensões e deformações geradas em cada camada de pavimento são comparadas com os critérios de projeto limitantes. Um método simples e conveniente para avaliar as propriedades estruturais dos pavimentos envolve a aplicação de uma carga e a medição do perfil de deflexão da profundidade resultante. (THOMPSON E VISSER, 1996).

³ THOMPSON, R.J. Ultra-heavy axle loads: design and management strategies for mine pavements. Planning and transport research centre. Patrec Research Forum. Kalgoorlie. p.15. 2009

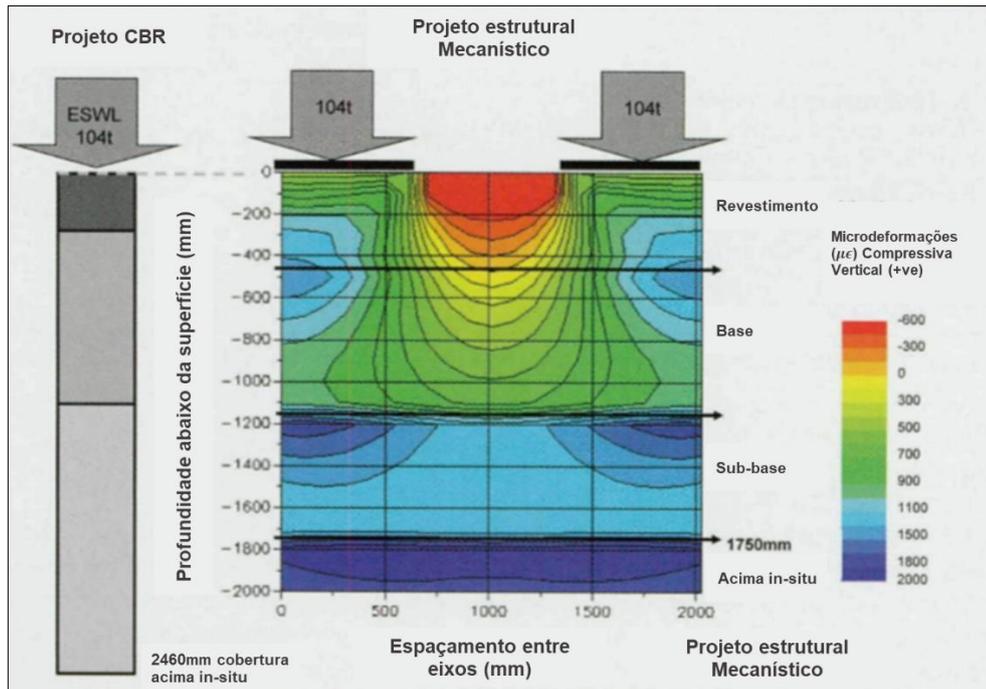


Figura 11 - Comparação entre o método CBR e mecanístico usando carga na roda de 104 toneladas métricas.

Fonte: Adaptado de Thompson (2011)

Ainda em Thompson e Visser (1996), os autores mostram que esse método apresenta como benefícios:

- Habilidade de acomodar cargas variáveis e seu impacto no desempenho estrutural do pavimento;
- A capacidade de utilizar materiais de construção disponíveis de forma mais eficiente;
- A capacidade de acomodar novos materiais;
- Previsões de desempenho mais confiáveis;
- Uso de propriedades de materiais no processo de projeto que estão mais intimamente relacionados ao desempenho de campo da estrutura;
- Uma melhor definição das propriedades existentes da camada de pavimento.

Visser (2013) determina, com uso da Tabela 3, variações mínimas e máximas de deformações verticais nas camadas permitidas para cada categoria de estrada, sendo que quanto maiores as cargas e volumes de tráfego (kt/dia) e quanto maior a vida útil e os requisitos de desempenho associados à estrada, menor é o valor crítico de deformações admissível. A partir desses dados, determina-se a espessura de proteção necessária para cada camada desempenhar de forma satisfatória ao longo

de sua vida útil. Sendo assim o autor propõe um limite superior de 2000 micro deformações verticais, geralmente colocadas em valores de deformação de camada. Números superiores a 2500 micro deformações estão associados a um desempenho estrutural inaceitável em todas as estradas, com exceção dos acessos de menor circulação e de curto prazo. (VISSER, 2013)

Lembrando que, conforme mostrado na Tabela 3, cada projeto de mineração possui características específicas e essas devem ser levadas em consideração para categorizar as estradas de transporte da mina e adotar intervalos de tempo diferentes. Dependendo do caráter do projeto de mina e conseqüentemente da vida útil das estradas dentro do contexto de prazo do projeto em que a mina está inserida, a categoria das estradas de transporte pode variar.

Tabela 3 - Sumário de categorias de estradas de transporte

Categoria de estrada de transporte	Descrição	Variação permissível para deformações verticais (micro deformações)	
		Volume de tráfego > 100 kt/dia	Volume de tráfego < 100 kt/dia
Categoria 1	Estradas principais, permanentes e de alto volume. Vida operacional de pelo menos 20 anos.	900	1500
Categoria 2	Estradas semipermanentes, dentro e fora do pit, estradas de transporte em rocha in situ, volumes médios de tráfego. Vida operacional abaixo dos 10 anos.	1500	2000
Categoria 3	Estradas transitórias, dentro e fora da mina, baixos volumes de tráfego. Vida operacional inferior a 3 anos.	2000	2500

Fonte: Adaptado Visser (2013)

2.3 PROJETO FUNCIONAL DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

O projeto funcional da rodovia é centrado na seleção de um material ou uma combinação de materiais mais apropriado para o revestimento da estrada. A escolha e a aplicação mais adequadas são necessárias para minimizar a frequência de formação de defeitos na superfície da estrada, proporcionando segurança,

melhorando a trafegabilidade do pavimento, redução de custo e menor impacto ambiental. (DOTTO, 2014; THOMPSON e VISSER 1999, 2000, 2003, 2006a).

Os atuais métodos de avaliação de desempenho funcional são subjetivos e de natureza localizada e qualquer deterioração na condição do pavimento é, portanto, difícil de avaliar. O fraco desempenho funcional manifesta-se pela:

- Baixa qualidade de condução;
- Poeira excessiva;
- Aumento do desgaste e danos nos pneus;
- Perda de produtividade.

O resultado desses efeitos é visto como um aumento nos custos gerais de operação e manutenção de veículos.

Em Tannant e Regensburg (2001) apud⁴ Thompson e Visser (1997, 2000) nos mostram que: durante estudos realizados na África do Sul, vários indicadores de desempenho funcional foram examinados, como, por exemplo, a frequência e severidade de defeitos nas estradas tais como: gravidade dos buracos, corrugações, sulcos, material solto, poeira, pedras fixas e soltas, rachaduras, erosão e resistência à derrapagem. Esses defeitos foram correlacionados às propriedades do material de superfície, tais como a relação de poeira, índice de plasticidade, CBR, coeficiente de granulometria, retração do material, bem como ciclo de manutenção e massa diária transportada. A partir desse estudo, foi possível estabelecer padrões (Tabela 4) que puderam auxiliar na caracterização dos materiais que compuseram o revestimento das estradas não pavimentadas de forma a fornecer o melhor desempenho funcional.

⁴ Thompson R.J. & Visser A.T. 1997. A mechanistic structural design procedure for surface mine haul roads. *Int. Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 11: 121-128.

Thompson R.J. & Visser A.T. 2000. The evaluation of mine haul road wearing course material performance. *Surface Mining - Braunkohl & Other Minerals*, 52(4), 409-415.

Tabela 4 - Propriedade de materiais recomendados para revestimentos das estradas de transporte

Propriedade	Min	Max	Impacto na funcionalidade
Produto de Contração	85	200	Redução no escorregamento, mas aumento em corrugações e material granulado
Coefficiente de graduação	20	35	Redução na erosão, mas induz tendência em material granulado
Taxa de geração de poeira	0.4	0.6	Redução na geração de poeira, mas induz geração de material granulado
Limite de Liquidez (%)	17	24	Redução no escorregamento, mas propenso à geração de poeira
Limite de Plasticidade (%)	12	17	Redução no escorregamento, mas propenso à geração de poeira
Índice de plasticidade (%)	4	8	Redução no escorregamento, mas propenso à geração de poeira
<i>California Bearing Ratio</i> (AASHTO)	80		Resistência à erosão e melhoria na trafegabilidade
Tamanho máximo de partícula (mm)		40	Facilidade na manutenção, sem danos aos pneus.

Sendo: Produto de contração = Contração linear x P425

Coefficiente de granulometria = $(P265 - P2) \times P475 / 100$

Taxa de geração de poeira = $P075 / P425$

Contração linear (%) = Índice de plasticidade / 2

Onde P075, P425, P2, P475 e P265 referente ao percentual de solo passante nas peneiras de tamanho 0.0075, 0.425, 2.0, 4.75, e 26.5 respectivamente.

Fonte: Adaptado de Tannant e Regensburg (2001) apud⁴ Thompson e Visser (1997, 2000)

Em Visser (2013) e Thompson e Visser (2000) apud⁵ Netterberg (1985) e Paige-Green (1989) definem a características ideais que os materiais para revestimento das estradas de transporte não pavimentadas devam apresentar:

- A capacidade de proporcionar uma condução segura e amigável ao veículo sem a necessidade de manutenção excessiva;
- Trafegabilidade adequada em condições úmidas e secas;
- A capacidade de drenar a água sem erosão excessiva;
- Resistência à ação de desgaste e abrasão promovida pelo tráfego;
- Ausência de poeira excessiva no tempo seco;
- Ausência de revestimento escorregadio excessivo em clima úmido;

⁵ NETTERBERG, F. Wearing courses for unpaved roads. NITRR technical note TS/33/85, CSIR, 1985, Pretoria, South Africa.

PAIGE-GREEN, P. The influence of geotechnical properties on the performance of gravel wearing course materials. PhD dissertation, University of Pretoria, 1989. South Africa.

- Baixo custo e facilidade de manutenção.

O resultado da seleção correta dos materiais para o projeto funcional pode ser obtido através da relação de duas propriedades (coeficiente de graduação e produto de contração do material) e a variação dessas propriedades e suas consequências nas estradas podem ser observadas na Figura 12.

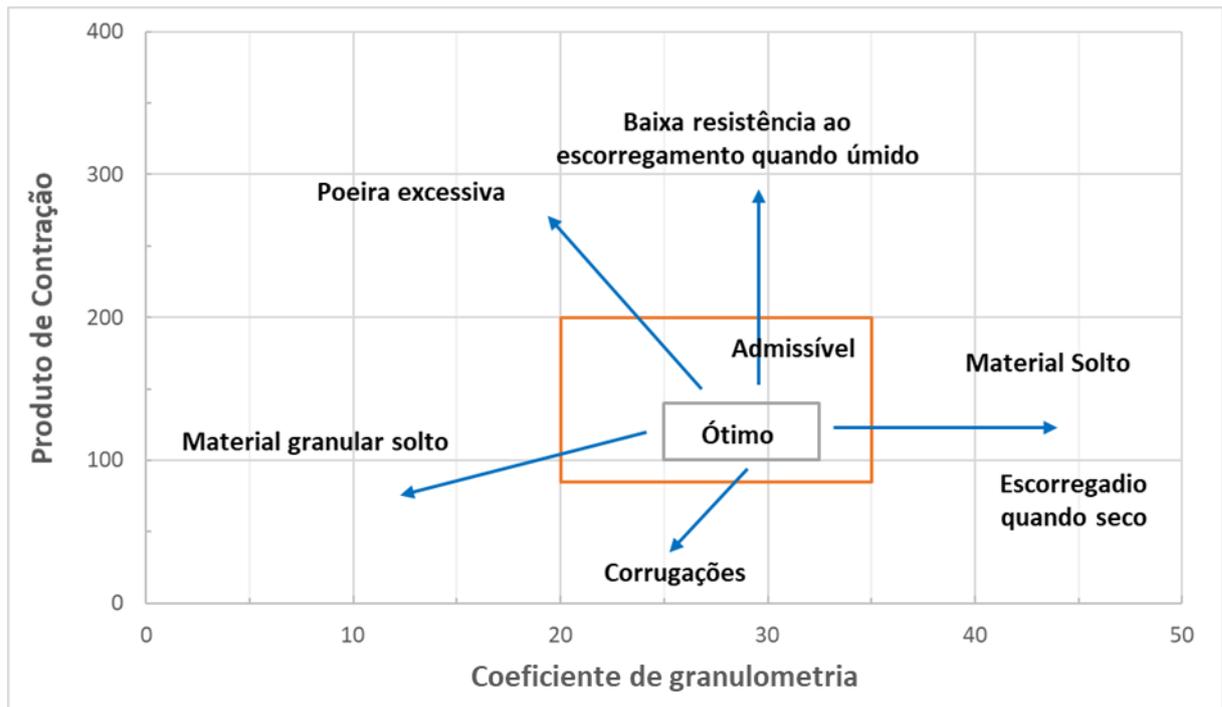


Figura 12 - Variação de valores ótimo e sub-ótimo para produto de contração e coeficiente de granulometria para materiais usados na superfície da estrada
 Fonte: Adaptado de Visser (2013)

2.3.1 Resistência ao rolamento

A condição da estrada pode ter impacto significativo, tanto no desempenho dos equipamentos por ela utilizado, quanto no gerenciamento de custos operacionais da mina. Relacionada a essa condição, a resistência ao rolamento se destaca como uma importante fonte de medida para caracterizar a qualidade de uma estrada e em avaliações de custos e estratégias de manutenção da mina.

As definições mais recorrentes para a resistência ao rolamento podem ser vistas em Elam; Teaster Jr; Lawless (1999) em que a define como a resistência física que impede a rolagem livre do veículo, incluindo irregularidades na estrada, deformação

da superfície da estrada e flexão dos pneus. Um valor típico para uma estrada firme e suave é equivalente à resistência encontrada em subir a 2% de declividade.

E em Caterpillar (2016), onde define Resistência ao rolamento como:

[...] medida da força que deve ser superada para rolar ou puxar uma roda sobre o solo. É afetado pelas condições do solo e pela carga - quanto mais profunda a roda afunda no solo, maior a resistência ao rolamento. O atrito interno e a flexão dos pneus também contribuem para a resistência ao rolamento. A experiência demonstrou que a resistência mínima é de 1% a 1,5% do peso bruto da máquina (nos pneus). Uma resistência de base de 2% é bastante usada para estimar. A resistência devido à penetração do pneu é de aproximadamente 1,5% do peso bruto da máquina para cada polegada de penetração do pneu (0,6% para cada cm de penetração do pneu).

Assim, a resistência ao rolamento pode ser calculada usando estas relações da conforme a equação 8:

$$RR = [2\% + (0.6\% \times a)] \times GVM \quad (8)$$

Fonte: Adaptado de Caterpillar (2016)

Sendo: RR – Resistência ao Rolamento

a – Penetração do pneu (cm)

GVM – Massa (t.)

Sendo assim, para cada centímetro de afundamento do pneu do caminhão é necessário mais 0.6% de seu peso em força para vencer a resistência ao movimento. Em Visser (2015), o autor considera um valor de referência entre 2.0 e 2.5% como um valor apropriado para maioria das estradas produtivas. Na Tabela 5 é possível verificar a variação da resistência ao rolamento em diversos tipos de pisos.

Tabela 5 - Variação da resistência ao rolamento em função do tipo piso

Piso	Resistencia do Rolamento (%) *	
	Pneus	
	Diagonais	Radiais
Pista de superfície muito dura, lisa, de concreto, asfalto frio ou de terra, sem penetração ou flexão	1.5	1.2
Pista de superfície dura, lisa, estabilizada, sem penetração sob carga, irrigada e bem conservada	2.0	1.7
Pista de superfície firme, lisa, com terra ou revestimento leve, flexionado ou ondulando ligeiramente sob carga, conservada regularmente, irrigada	3.0	2.5
Pista de terra sulcada, flexionando sob carga, com pouca ou nenhuma manutenção, sem irrigação. Penetração ou flexão de pneu de 25mm (1")	4.0	4.0
Pista de terra sulcada, flexionando sob carga, com pouca ou nenhuma manutenção, sem irrigação. Penetração ou flexão de pneus de 50mm (2")	5.0	5.0
Pista de terra sulcada, flexionando sob carga, com pouca ou nenhuma manutenção, sem irrigação. Penetração ou flexão de pneus de 100mm (4")	8.0	8.0
Areia ou pedregulho solto	10.0	10.0
Pista de terra sulcada macia, sem manutenção nem estabilidade, penetração e flexão de pneus de 200mm (8")	14.0	14.0
Pista de terra sulcada muito macia, lamacenta, com penetração de pneus de 300mm (12"), sem flexão	20.0	20.0

* Percentual do peso combinado da máquina

Fonte – Adaptado de Caterpillar (2016)

Sousa (2011) em sua dissertação afirma que o parâmetro de resistência ao rolamento é utilizado na avaliação de desempenho funcional das estradas e em modelos de custo operacional de caminhões e objetiva-se obter a frequência ótima de manutenção de tais vias. Karafiath (1988) relata que dentre as características do local que afetam o desempenho de veículos de transporte, as mais importantes são a declividade e a resistência do rolamento.

Em Komatsu (2013), a resistência ao rolamento de uma estrada de transporte está relacionada principalmente com o material de desgaste usado, suas propriedades e

a frequência de tráfego na estrada. Estes ditam, em grande medida, a taxa de aumento da resistência ao rolamento

O impacto da resistência ao rolamento pode ter grandes consequências na eficiência da frota (Austrália, 2017), como, por exemplo, os citados por Holman (2006) e ilustrado na Figura 13:

- Aumento no consumo de combustível devido a viagens mais lentas e utilização de machas mais fortes;
- Aumento no custo por tonelada transportada devido à baixa produtividade;
- Aumento no consumo de pneus devido a maiores desgastes e potenciais falhas;
- Aumento no custo com equipamentos e manutenção devido à maior desgastes e fadiga dos componentes.

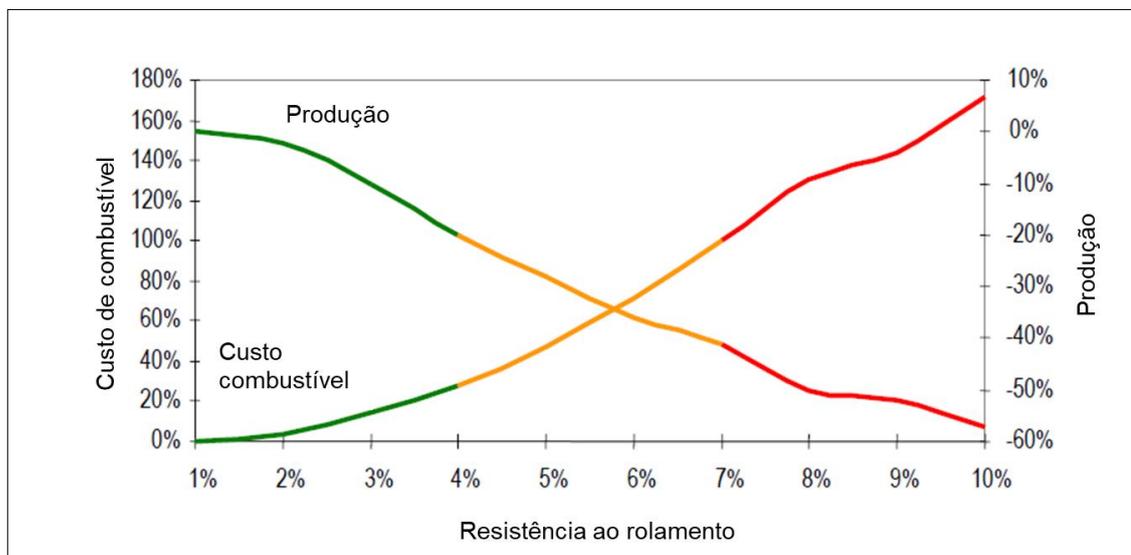


Figura 13 - Desempenho do caminhão x Resistência ao rolamento
Fonte: Adaptado de Holman (2006)

Thompson e Visser (2006b) exemplificam que, para uma frota com capacidade de carga de 290 t, 498 t de massa bruta do veículo (GVM) operando em um trecho de 4 km sob uma inclinação de 10%, se a resistência ao rolamento da via for reduzida de 6% para 2%, o custo de capital do equipamento necessário para movimentar 30 milhões de toneladas por ano reduz em 18% enquanto os custos operacionais do caminhão reduzem em 16%.

REIS (2014) descreve que:

[...] para que os custos de operação de uma estrada não sejam exacerbados, é necessário que haja um equilíbrio entre a resistência ao rolamento aceitável em uma estrada, definida por quem a gere, e as operações necessárias à manutenção deste parâmetro. Se a resistência ao rolamento aceitável for muito baixa, a frequência de manutenção terá que ser muito alta, o que eleva os custos de manutenção, porém diminui os custos de operação de veículos. Por outro lado, se é admitida uma resistência ao rolamento maior, a frequência e os custos de manutenção caem, porém, os custos de operação dos veículos aumentam consideravelmente. Como se deseja que os custos totais (operação e manutenção) da estrada sejam o mínimo possível deve-se então buscar um ponto de equilíbrio. Ao se definir o mínimo custo total de operação da estrada, consegue-se definir também a resistência ao rolamento aceitável e frequência de manutenção que leva a esta resistência.

Essa relação pode ser vista pela Figura 14.

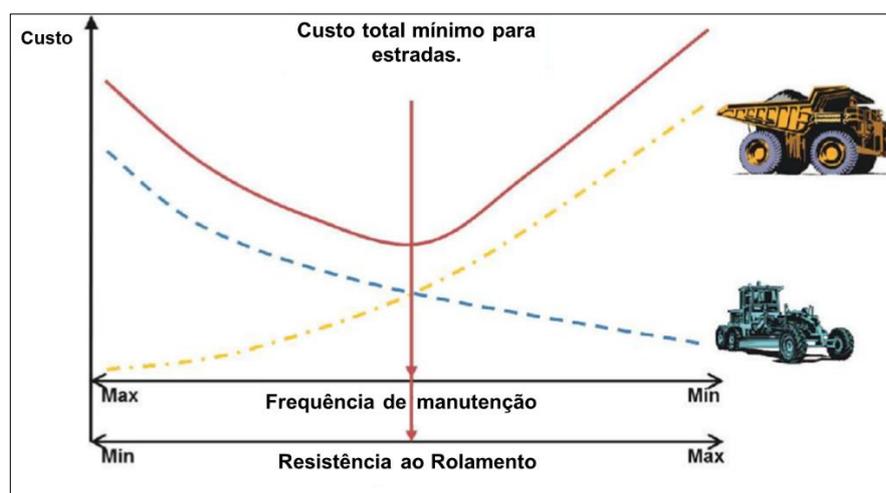


Figura 14 - Relação entre custo operacional do veículo e manutenção de estrada em função da frequência de manutenção e resistência ao rolamento
Fonte – Adaptado Thompson (2018)

Em trabalhos desenvolvidos por Thompson e Visser (1999, 2006a) verifica-se o desenvolvimento e implantação de um sistema de gerenciamento, a fim de identificar e quantificar (Tabela 6) defeitos ocorridos ao longo das estradas não pavimentadas da mina. Esse sistema baseia-se na classificação da camada de revestimento de uma estrada para identificação de manutenção e determinação da resistência ao rolamento da estrada. Os autores dizem que como a resistência ao rolamento está relacionada a má conservação da superfície da estrada, em termos de número de defeitos, então é possível classificar a superfície de acordo com:

- O Quanto do segmento de estrada é afetado pelo defeito (a 'extensão'), em uma escala de 1 a 5;
- Quão grave é o defeito (o 'grau') em uma escala de 1 a 5.

Tabela 6 - Avaliações da resistência ao rolamento em revestimento

Pontuação	Grau do Defeito	Extensão do defeito
1 - Leve	Dificuldade de discernir e somente sinais visíveis leves.	Ocorrência isolada, menos de 5% da estrada afetada.
2 - Entre leve e alerta	Facilmente discernível, mas com baixa consequência imediata	Ocorrência intermitente, entre 5% e 15% da estrada afetada.
3 - Alerta	Defeito notável, com possíveis consequências - Início de defeitos secundários.	Ocorrência regular, entre 16% e 30% da estrada afetada.
4 - Entre alerta e severo	Defeito severos, com possíveis consequências - Início de defeitos secundários.	Ocorrência frequente, entre 31% e 60% da estrada afetada.
5 - Severo	Defeito extremos, com possíveis consequências - Início de defeitos secundários.	Ocorrência extensas, mais de 60% da área afetada.

Fonte – Adaptado de Visser (2013)

Uma vez levantados os dados da estrada, o método propõe multiplicar a extensão pelo grau de defeitos da estrada e, com isso, obter uma pontuação de defeitos. Essa pontuação é então utilizada para, dentro dos limites propostos pelo autor, realizar ou não as manutenções para restabelecer as condições ideais para trafegabilidade da estrada (Figura 15). Esse mesmo processo é, também, utilizado para determinar a resistência ao rolamento, sendo para esse caso, utilizado apenas os defeitos relacionados à resistência que a estrada possa aplicar ao caminhão

FICHA DE AVALIAÇÃO DE ESTRADA DE MINA

AVALIAÇÃO VISUAL QUALITATIVA E ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

Data:	Responsável :
Estrada:	Velocidade de tráfego (Km/h):
Trecho:	Carga (T/dia):

Funcionalidade			
Defeito	Grau (1-5)	Extensão (1-5)	Pontuação de defeitos
Deformações			
Corrugações			(*)
Trilha de roda			
Material solto			(*)
Caráter pedregoso			(*)
Poeira			(*)
Material solto sobre estrada			
Trincas longitudinais			
Trincas transversais			
Rachaduras tipo courdo de Jacaré			
Ecorregadio quando seco			(*)
Escorregadio quando úmido			(*)
Pontuação total do defeitos funcionais (DS) $\Sigma(\text{Grau} \times \text{Extensão})$			

Resistência do rolamento		
Grau (1-5)	Extensão (1-5)	Pontuação de defeitos
Pontuação total do defeitos funcionais		

Verificar ábaco de percentual de resistência ao rolamento

Manutenção da estrada recomendada se qualquer defeito funcional crítico exceder o limite de aceitabilidade (*) ou DS > 140

Manutenção da estrada eminente , mas estrada trafegável quando o total de defeitos pontuar 65<DS<140

Estrada em boa condição, sem necessidade de manutenção eminente da estrada quando o total de defeitos pontuar DS<64

Figura 15 - Ficha de avaliação de estrada de mina
Fonte: Adaptado de Visser (2013)

Uma vez obtida a pontuação total, aplica-se o ábaco da Figura 16 para determinar a resistência ao rolamento. Os autores reforçam também, que o desenvolvimento e a compreensão desses defeitos são um caminho para se determinarem estratégias de melhoria apropriada para cada trecho da rede de transporte da mina.

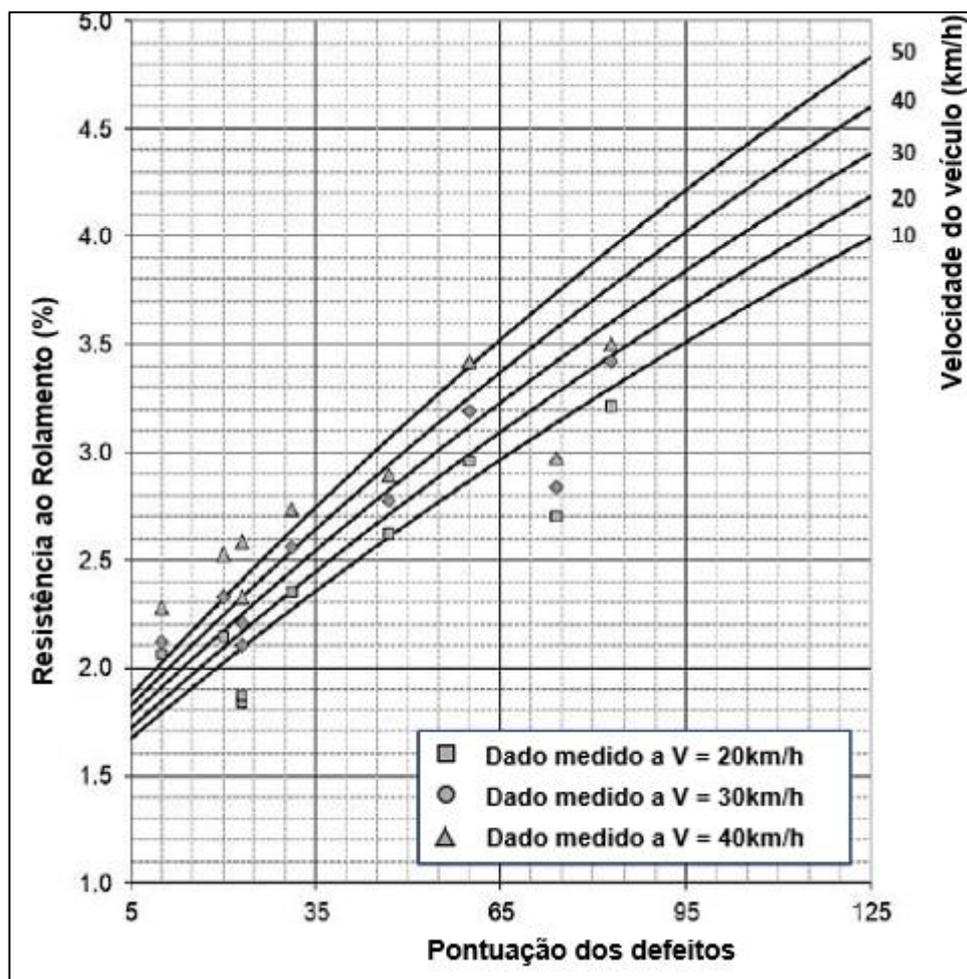


Figura 16 - Avaliação de resistência ao rolamento em revestimentos de estradas
 Fonte – Adaptado de Visser (2013)

2.3.2 Sistema de monitoramento de frota

Sistemas de monitoramento de frota consiste em sistemas frequentemente empregados em grandes empresas para o monitoramento de produção, otimização e manutenção em tempo integral. Pinto (2007) e Junior (2014) descrevem em seus estudos os objetivos principais do despacho computadorizado como sendo o de maximizar o tempo produtivo na mina, minimizar o número necessário de caminhões para o transporte, maximizar a produção dos equipamentos de carga através da redução de sua ociosidade e atender aos padrões de qualidade da usina de beneficiamento. O sistema de despacho tem atribuição de otimizar os caminhões de transporte utilizando algoritmos, associado a equipamentos eletrônicos e comunicação de campo para oferecer maior produtividade, maior eficiência e otimização de toda a frota.

Paralelo ao sistema de otimização de frota, encontram-se ferramentas desenvolvidas para o monitoramento da saúde do equipamento. Esse é responsável pela coleta de indicadores críticos de performance do caminhão para análise em tempo real e que podem ser utilizados para diagnosticar problemas antes do envio da equipe de manutenção para a frente de trabalho. Outra finalidade desses sistemas é a possibilidade de geração de eventos, monitoramento e documentação de funções. Além disso, associados aos diversos sensores dispostos no caminhão, esses podem ser computados pelo controle da qualidade dos pavimentos das estradas da mina, permitindo uma prevenção proativa no equipamento.

Um exemplo de sistema que permite esse controle é o MineCare[®] fornecido pela Modular Mining. Esse sistema empresarial, foi projetado para aperfeiçoar a capacidade do equipamento, aumentando a sua disponibilidade e desempenho. Teixeira (2016) explica em seus estudos que o objetivo desse sistema é auxiliar as empresas de mineração a manter a integridade da frota de equipamentos de produção, sendo sua principal função o fornecimento de dados em tempo real do estado do equipamento e converter esses dados em informações para manutenção e operação de mina.

Em Modular Mining (2012a) explica a funcionalidade do sistema:

O MineCare[®] continuamente captura e monitora em tempo real, dados críticos sobre o estado do equipamento através de dispositivos de monitoramento tais como VIMS, Statex, DDEC, entre outros. Notifica os usuários sobre eventos do sistema DISPATCH[®], como apto, parado etc. Permite um gerenciamento eficiente dos eventos de manutenção. Pode identificar, e até prever, problemas de manutenção, para que sejam tratados em tempo real.

Outro Sistema que fornece um gama de informações é o Sistema de Gerenciamento de Informações Vitais da Caterpillar (VIMS). Chamara (2013) explica em sua tese esse sistema:

[...] Consiste também na coleta de leituras dos diversos sensores do caminhão, permitindo que técnicos, engenheiros, gerentes e Caterpillar monitorem as condições do veículo e também realizar análises de inteligência para melhorar a eficiência da produção e reduzir os custos. Os sensores de pressão do suporte do caminhão são quatro sensores críticos no caminhão que o VIMS usa para calcular a carga útil do caminhão.

No caso da Modular Mining, a funcionalidade dos sistemas de gerenciamento de informações dos equipamentos de mina consiste em: tratamento de eventos, rastreamento de tempo, monitoramento em tempo real e criação tendências. O funcionamento desses sistemas, ocorre através de coleta de dados para uma central que são provenientes de dispositivos OEM (*Original Equipment Manufacturer*) e do computador de bordo. A central coleta, processa e transmite os dados através da rede sem fio MasterLink e um servidor de aplicações do Minecare® processa as informações.

Na aplicação de monitoramento em tempo real (Figura 17), Modular Mining (2011a) explica que:

Com este aplicativo, é possível exibir parâmetros da interface OEM (em forma de gráficos) em tempo real para um caminhão específico, escavadeira ou equipamento auxiliar. É possível selecionar quaisquer parâmetros que precisam ser vistos a partir de qualquer interface OEM (Statex, VIMS, PLMS etc.) a bordo do equipamento. [...] Essa combinação fornece uma observação rápida e abrangente do estado atual do equipamento selecionado. Suponha que um operador de caminhão transmita um registro de força baixa nas inclinações. Antes de decidir enviar o caminhão para a oficina, é possível exibir vários parâmetros do motor do caminhão (a partir da interface de bordo) e, simultaneamente, monitorar a velocidade e outros valores exibidos no painel. Dessa forma, é possível tomar uma decisão com mais informações para remover o caminhão da operação, uma medida de remoção com potencial de custo mais alto.

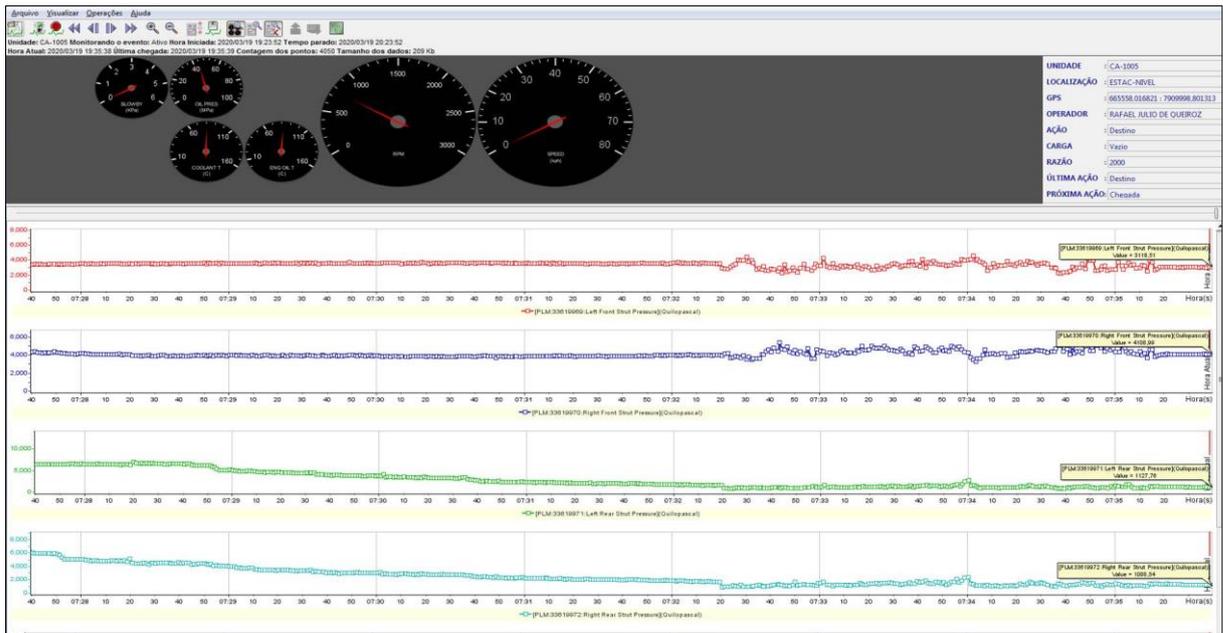


Figura 17 - Interface para monitoramento em tempo real de um caminhão Komatsu 830E-AC

Já para as análises de tendências, uma configuração é feita para capturar informações de parâmetros específicos de determinado equipamento que se deseja avaliar. Ao contrário do monitoramento em tempo real, as avaliações por tendências somente ocorrem quando um determinado parâmetro atinge os critérios definidos pelo usuário. Modular Mining (2012b) explica que “Uma tendência é uma mudança definida por uma leitura de parâmetro ou uma mudança definida no relacionamento entre duas ou mais leituras de um parâmetro”.

Modular Mining (2011b) lista as informações que um modelo de tendência específica:

- Leituras do parâmetro do veículo
- Dados adicionais a serem coletados quando as leituras do parâmetro monitorado alcançam níveis específicos
- Procedimentos de análise de dados para serem desempenhados sobre os dados coletados
- Ações do sistema a serem tomadas quando os dados coletados alcançarem as condições predefinidas

2.3.3 Identificação de defeitos em estradas

O transporte de minério e estéril na mina representa um dos maiores custos na operação da mina, principalmente em grandes operações, com cavas profundas e ou de grandes extensões. Estimativas mostram que o custo de mineração, entre 50% (Thompson, 2018), podendo alcançar a 80% (Mohutsiwa e Musingwini, 2015), está associado com carregamento e transporte de materiais em tais cavas.

O entendimento do comportamento e tendências de defeitos ao longo da estrada e como elas respondem aos caminhões que as utilizam, seja pelas suas extensões, severidade e frequência de surgimento, resultam no aumento da resistência ao rolamento. O primeiro passo para otimizar o direcionamento de recursos é estudar os melhores métodos e a frequência de atuação sobre defeitos, seja na estrutura, revestimento ou mesmo no arranjo geométrico da via, com o uso da coleta de dados.

Ainda em Thompson (2018) diz que atualmente, as empresas de mineração estão coletando grandes quantidades de dados de equipamentos para monitorar e otimizar o desempenho da frota. Além de combinar essas informações, existentes quase em tempo real, das frotas de transporte para outras fontes de informações específicas do local e da estrada para medir e gerenciar o desempenho de caminhões e motoristas. Essas mesmas técnicas podem ser usadas para determinar como as estradas de transporte funcionam e como se sustentam no local da mina. Portanto, se os engenheiros puderem identificar as estradas mais suscetíveis a danos, eles poderão concentrar os recursos de manutenção da mina nessas estradas ou trechos, gerando redução significativa dos custos operacionais do veículo ao longo da vida da estrada.

Um sistema de gerenciamento de manutenção em tempo real avalia a condição do acesso, sendo monitorada pela análise a bordo da interação entre caminhão e estrada, integrada aos sistemas de comunicação e localização de caminhões da mina. Em estudos realizado por Park, Popov, Cole (2004); Hugo (2005); Ngwangwa *et al.* (2010) e Ngwangwa e Heyns (2014) propõe um procedimento para utilizar respostas medidas em um veículo para reconstruir perfis de estradas e seus defeitos

de atendimento. O estudo busca capitalizar a popularização dos sistemas de informação de veículos, no qual cada vez mais os sensores são embarcados para avaliar o desempenho do equipamento e a integridade estrutural das suspensões.

Em Thompson *et al* (2003), os autores abordam um sistema em tempo real que integra dados de interação de caminhões e pavimentos como parâmetro para tomar decisões baseadas em gerenciamento de estradas. Esse sistema utiliza como ponto de partida uma comunicação existente na mina com GPS de localização de caminhões, o sistema proposto é ilustrado na Figura 18, mostrando como os sistemas existentes de comunicação, localização e monitoramento de caminhões são integrados e as informações do sistema aplicadas em decisões de manutenção de estradas.

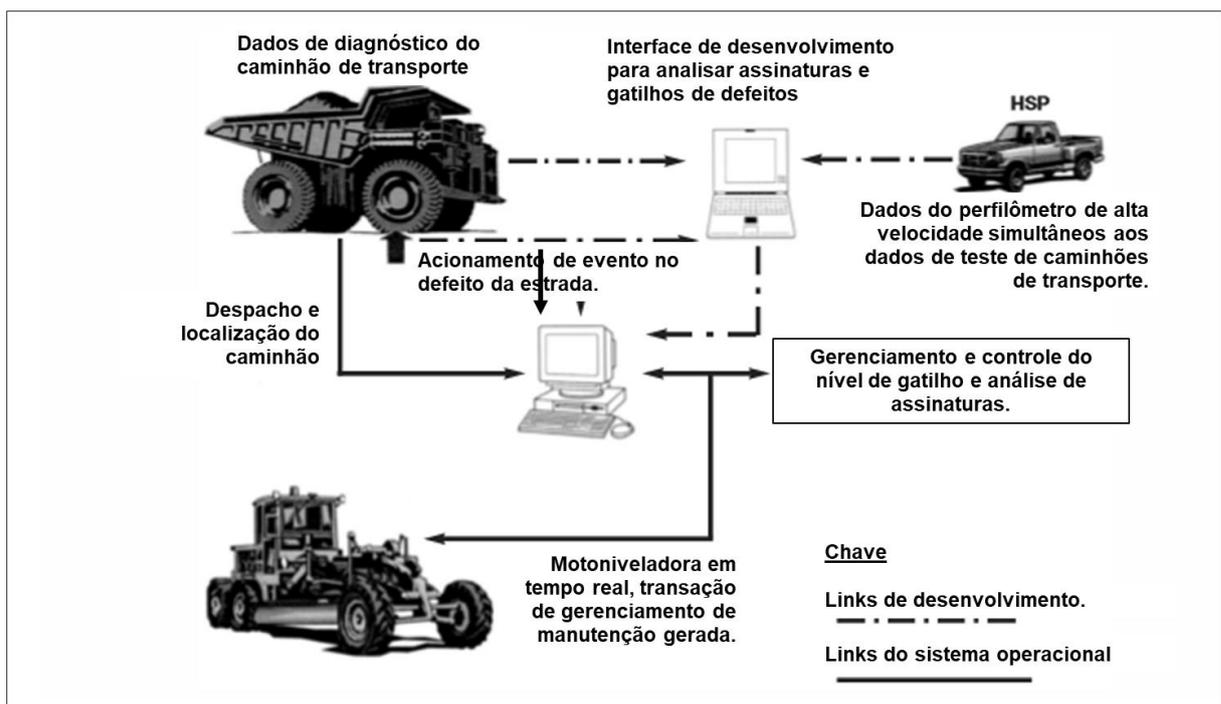


Figura 18 - Desenvolvimento e integração de Sistema de manutenção de estrada em tempo real com comunicação, locação e monitoramento existente
 Fonte – Adaptado de Thompson *et al* (2003)

Thompson *et al* (2003) explicam o funcionamento desse sistema de manutenção:

Uma vez que os locais de defeito de estrada são recebidos pela central de comunicações na mina e os pesos apropriados aplicados (para volumes de tráfego, tipo e gravidade do defeito, etc.), uma transação é iniciada para informar automaticamente o operador da motoniveladora dos locais e tipo de defeito. A resistência ao

rolamento também pode ser monitorada de forma semelhante, portanto, áreas de alta resistência ao rolamento (que podem não estar associadas a um defeito de estrada específico, mas uma alta densidade de defeitos em uma determinada seção da estrada) também podem ser reconhecidas e reparadas em tempo real.

Outros benefícios associados derivados dessa abordagem são listados por Thompson *et al* (2003):

- Históricos de mapas de eventos que mostram seções sistematicamente ruins de estradas que requerem melhoria ou reabilitação;
- Utilização mais eficaz dos ativos de manutenção de estradas existentes: resposta rápida a defeitos de estrada identificados;
- Redução de gastos de capital em ativos de manutenção de estradas: a expansão da rede rodoviária pode ser efetivamente mantida com menos equipamentos;
- Reconhecimento imediato das condições da estrada de transporte - inspeção visual para cada mudança de rota do caminhão desnecessária;
- O aumento da utilização do sistema existente de gerenciamento de mina e transporte baseado em computador para fornecer dados e informações de forma simplificada e integrada.

Capítulo 3

METODOLOGIA

Será apresentada durante esse capítulo a metodologia desenvolvida para avaliação de defeitos em estradas de transporte utilizando a variação de velocidade e pressão das suspensões do caminhão. Além disso são apresentadas as propostas de adequação das estradas, simulando a correção dos defeitos encontrados a partir de correções em seus parâmetros geométricos. Na

Figura 19 é apresentado o fluxograma das etapas realizadas e proposto pela metodologia do estudo para alcançar as metas estabelecidas para esse projeto.

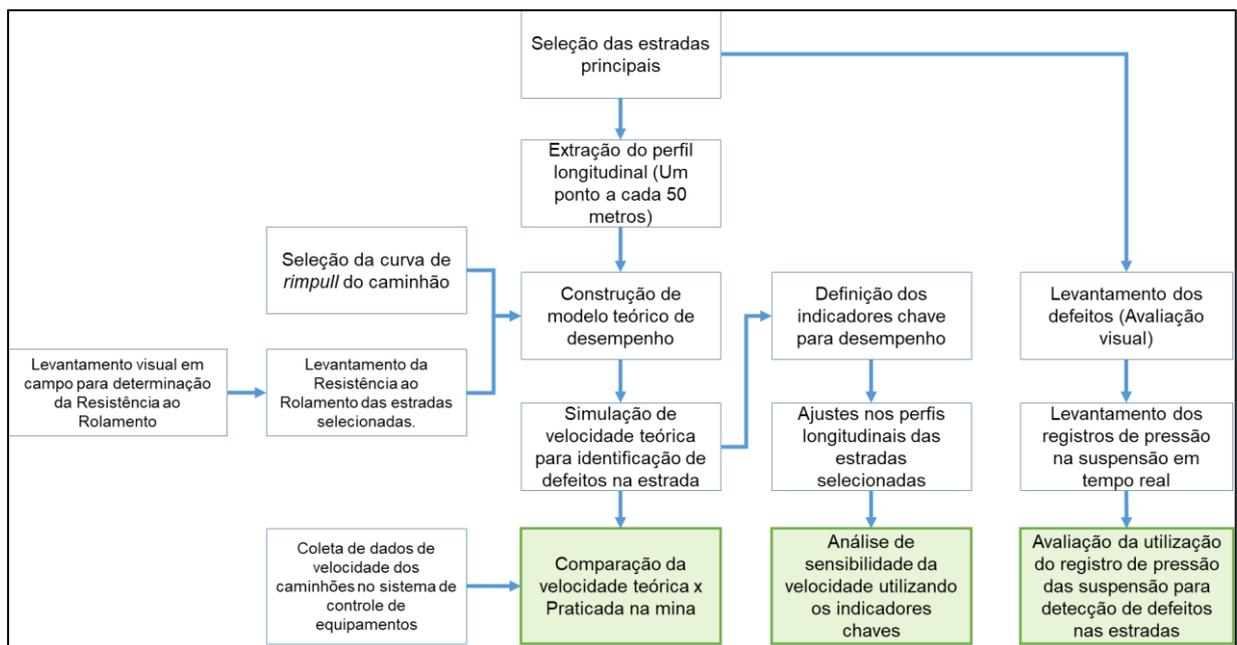


Figura 19 - Fluxograma de análise de defeitos em estrada por meio de velocidade dos caminhões

A metodologia proposta foi desenvolvida e aplicada a um estudo de caso onde foi possível coletar os dados reais de operação e os perfis geométricos dos acessos. Diante disso, o local de aplicação dos testes escolhido foi a mina do Sapo, situada no município de Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais, inserido na Serra do Espinhaço (Figura 20). Essa mina, pertencente ao complexo Minas-Rio, consiste em

uma operação de minério de ferro integrada, constituída de uma mina, usina de beneficiamento, mineroduto e terminal no Porto de Açú.



Figura 20 - Imagem de satélite da Mina do Sapo – Projeto Minas Rio

Fonte: GOOGLE MAPS. [Mapa topográfico da Mina do Sapo – Projeto Minas Rio]. [2020]. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 23 de janeiro 2020

Na Mina do Sapo foram escolhidas três estradas (Figura 21) para realizar a avaliação de melhorias na geometria dos acessos nos quais trafegam os caminhões 830E-AC, da Komatsu, de grande porte. O controle e monitoramento dessas vias são fundamentais para reduzir impactos diretos no desempenho dos equipamentos. Uma boa estratégia de monitoramento da qualidade e manutenção desses acessos tem como principais perspectivas melhorias nos tempos de ciclo, redução de desgastes dos componentes do caminhão e segurança durante o tráfego.

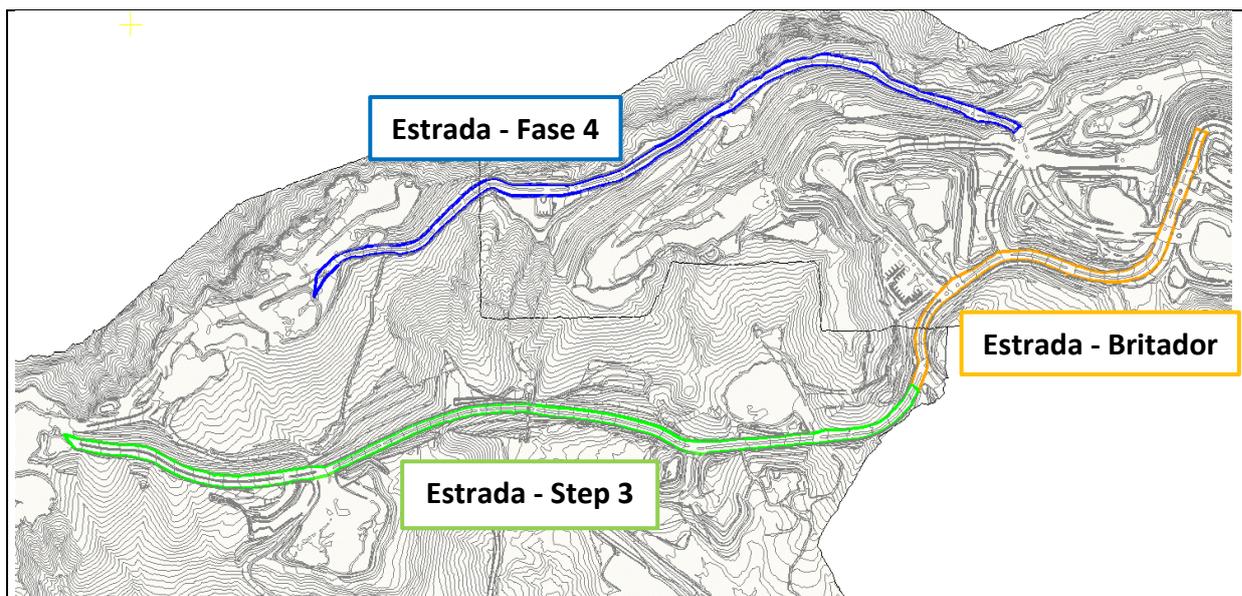


Figura 21 - Estradas permanentes selecionadas para avaliação

Essas estradas possuem alta relevância por serem consideradas vias principais, permanentes, de alto volume de tráfego e que possuem uma vida operacional longa. Suas características geométricas estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características geométricas dos acessos

Características geométricas dos acessos				
Estrada	Comprimento (m)	Largura de Pista (m)	Altura de Berma (m)	Área (m²)
Britador	1.580	35	2,2	58.381
Step3	3.222	30-33	2,1	105.611
Fase4	2.781	40	2,0	88.019

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL LONGITUDINAL DAS ESTRADAS

Uma vez definidas as estradas de interesse para o estudo, por meio de levantamentos topográficos, foram demarcados e coletados pontos a cada 50 metros (Figura 22), contendo suas coordenadas (x, y e z). Esses pontos serviram para calcular a velocidade por trecho ao longo de cada um dos acessos selecionados, possibilitando a avaliação do comportamento do deslocamento dos caminhões, considerando o estado de preservação atual das estradas.

O perfil longitudinal e o sentido de transporte de material para cada estrada podem ser vistos na Figura 22. A estrada da Fase 4 e do Step 3 apresentam o mesmo

sentido de transporte, os caminhões descem a rampa carregados, vindo das frentes de lavra, e sobem a mesma rampa descarregados para serem novamente carregados e completar seu ciclo de transporte. A estrada do Britador possui uma inversão em relação às outras duas, nesse caso os caminhões sobem carregados em direção à britagem e retornam descarregados em direção às frentes de lavra.

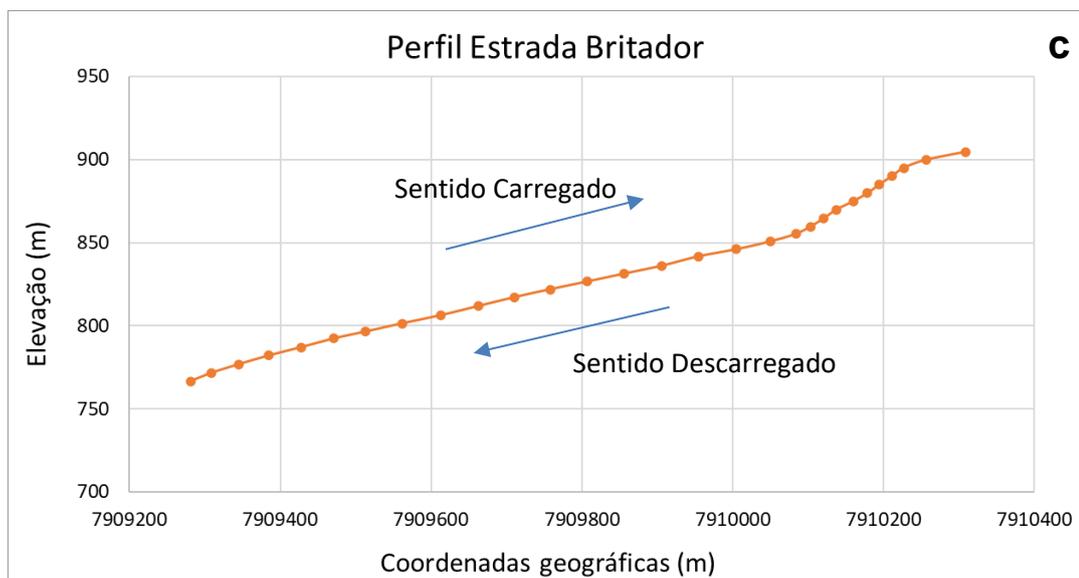
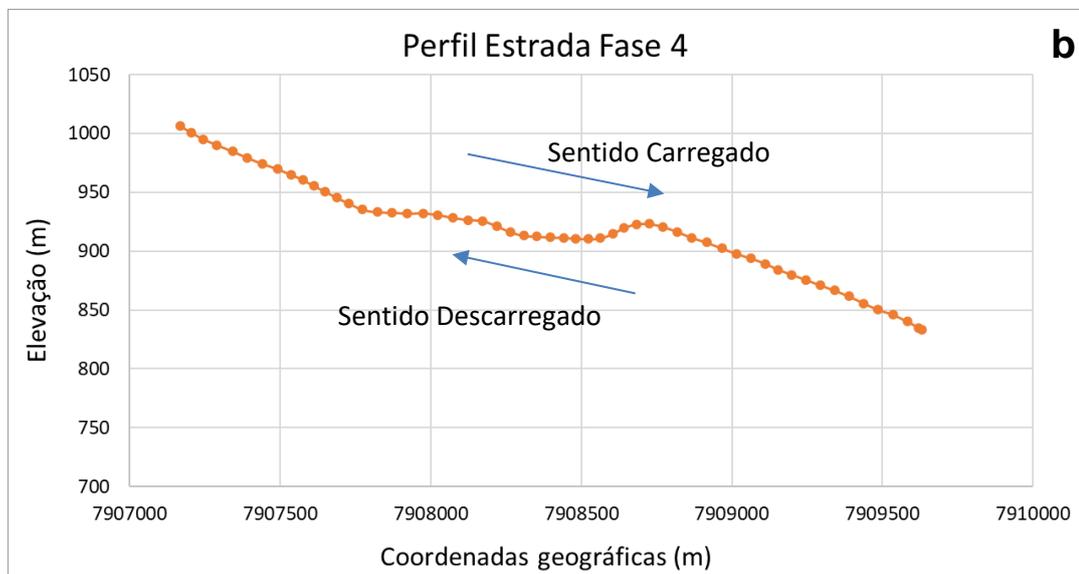
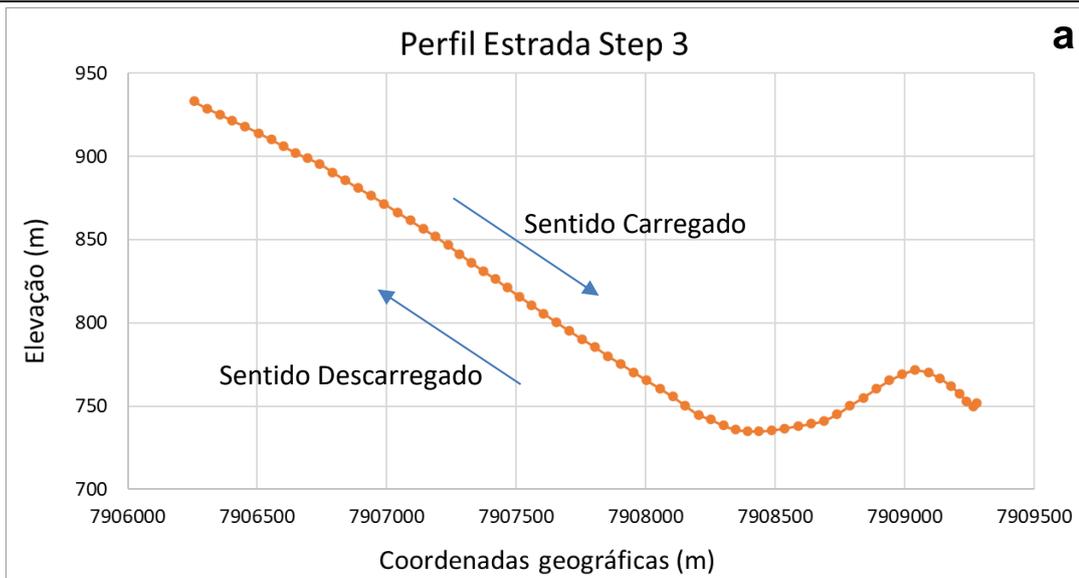


Figura 22 - Perfil da estrada (Pontos a cada 50m) permanente Step 3 (a), Fase 4 (b) Britador (c)

3.2 CONSTRUÇÃO DE MODELO DE DESEMPENHO E AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE TEÓRICA

Para calcular o desempenho dos caminhões da marca Komatsu, modelo 830E-AC nas condições atuais das estradas, foi utilizado o software TALPAC, da empresa RungePincokMinarco. Esse software permite realizar o dimensionamento de frota em uma mina, bem como a possibilidade de extrair informações detalhadas do ciclo de transporte do caminhão. Para isso, foi necessário importar os perfis das três vias, determinar as condições quanto à resistência ao rolamento de cada estrada e a carga média dos caminhões quando carregados. Destaca-se que, na mina, a velocidade máxima permitida para os caminhões são de 40km/h, por questões de segurança. Porém, quando os caminhões estão descendo com material na caçamba (deslocamento carregado) em declividades inferiores a -6% a velocidade máxima permitida passa ser de 28 km/h.

3.2.1 Seleção da curva de *rimpull* dos caminhões

O software TALPAC utiliza as curvas de desempenho, também conhecidas como curvas de *rimpull*. Essas curvas permitem calcular a velocidade esperada do caminhão ao longo de cada trecho da estrada não pavimentada, por meio da massa bruta do caminhão, a carga média (*payload*) e a inclinação dessas vias.

O *rimpull* pode ser traduzido como a quantidade de força exercida pelo caminhão entre a zona de contato do veículo e o solo. É essa força que permitirá que o equipamento saia do estado de inércia e se movimente.

A interpretação da curva de desempenho, disponível no manual de especificação e aplicação, é tomada das equações 9 e 10:

Calcula-se a resistência total da via.

$$TR = RI + RR \quad (9)$$

Onde:

TR - Resistência Total (%)

RI - Resistência de Inclinação (%)

RR - Resistência ao rolamento (%)

Calcula-se o *Rimpull* requerido.

$$Rimpull = GVM \times TR \quad (10)$$

Onde:

GVM - Massa bruto do caminhão (t)

TR - Resistência Total (%)

A velocidade é então definida pela interceptação de duas retas que passam pelos valores obtidos no *rimpull* e velocidade de viagem (Figura 23)

Para ilustração, tendo um caminhão de massa de 162t (EVM – massa vazio do caminhão) com carga de 250t subindo, conforme Figura 23 (a) tem-se:

1 - $GVM (EVM + Carga) * (Declividade + Resistência\ ao\ rolamento)$

2 - $(162\ t + 250\ t) * (10\% + 3\%) = 53,56\ t$

Velocidade máxima de aproximadamente: 11 km/h

Enquanto que o mesmo caminhão, com carga de 250t descendo a mesma rampa, conforme Figura 23 (b), tem-se:

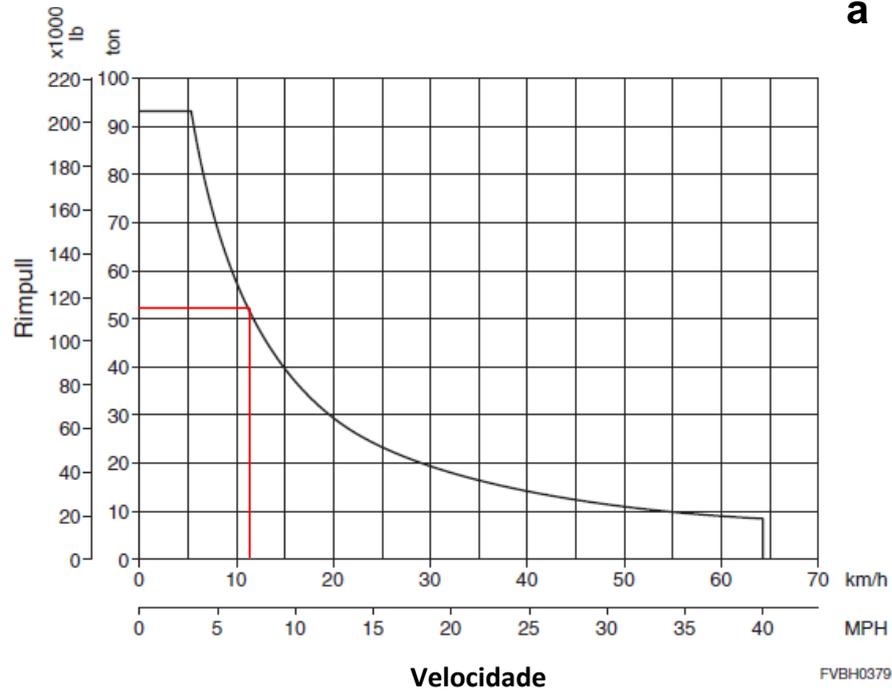
1 - $GVM (EVM + Carga) * (Declividade - Resistência\ ao\ rolamento)$

2 - $(162\ t + 250\ t) * (10\% - 3\%) = 28,84\ t$

Velocidade máxima de aproximadamente: 32 km/h, no entanto limitada à 28 km/h em função de regulamentação de segurança da operação e limite sugerido pelo fornecedor do caminhão.

Desempenho aceleração

a



Desempenho Retardo

b

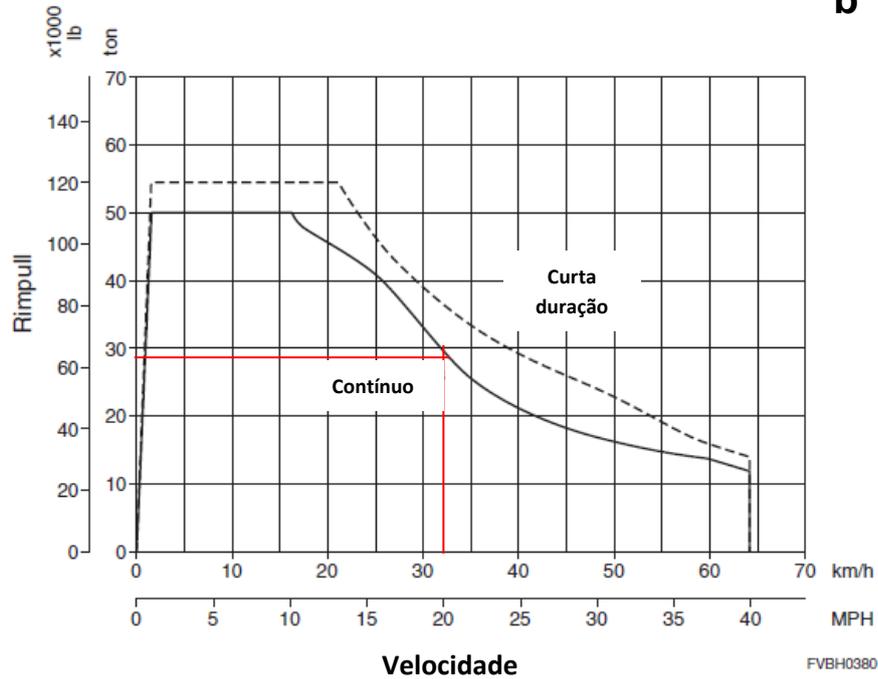


Figura 23 - Curva de performance para caminhão Komatsu 830E-AC Desempenho aceleração (a)
Desempenho retardo (b)
Fonte: Adaptado de Komatsu (2013)

3.2.2 Levantamento da resistência ao rolamento das estradas selecionadas

Para simular a velocidade teórica das estradas foi necessário calcular a resistência ao rolamento que as vias apresentavam no momento que o estudo estava sendo realizado. Esse levantamento foi feito a partir da ficha de inspeção visual qualitativa e estimativa de resistência ao rolamento desenvolvida por Visser (2013). Essa ficha, descrita na seção 2.3.2, possibilitou avaliar e pontuar cada uma das três estradas quanto ao nível de severidade e extensão dos defeitos relacionados à resistência ao rolamento. Os itens avaliados e que apresentam correlação direta à resistência ao rolamento foram: deformações, corrugações, trilha de rodas, material solto, caráter pedregoso.

3.2.3 Comparação da velocidade praticada nas estradas

Para comparar a velocidade praticada nas estradas da mina, foram levantados durante o período de estudo a velocidade e coordenadas posicionais do caminhão à medida em que ele passava pelas estradas. Esses dados, vistos nas Figura 24, Figura 25 e Figura 26, foram tratados para possibilitar a comparação com o desempenho teórico.

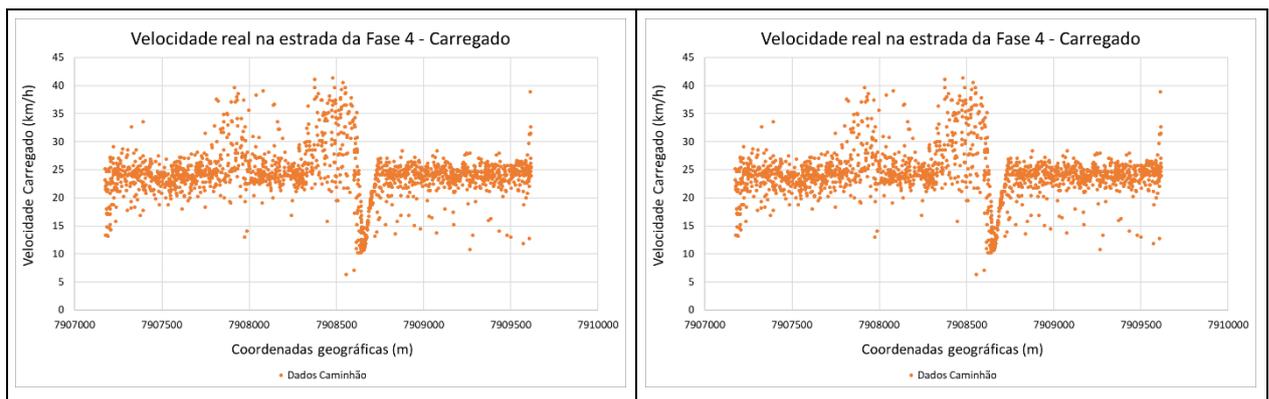


Figura 24 - Desempenho real dos caminhões carregados e descarregados na estrada da Fase 4

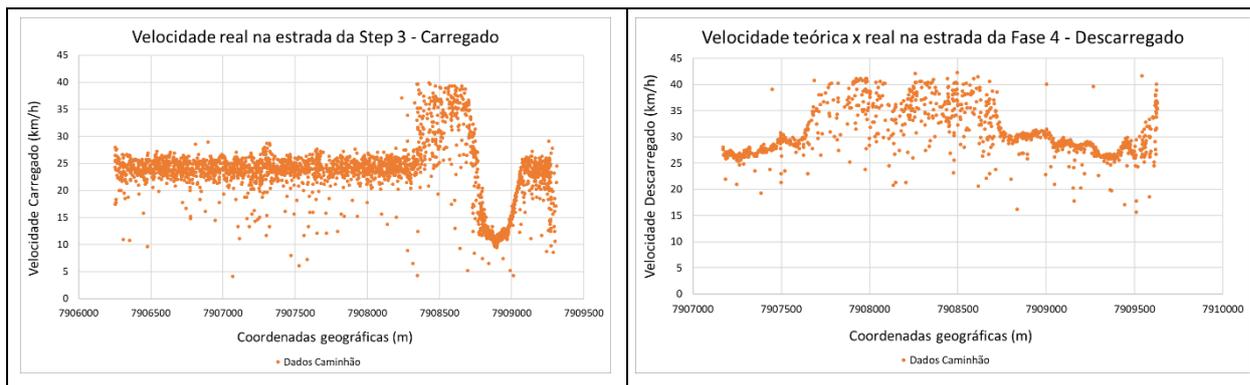


Figura 25 - Desempenho real dos caminhões carregados e descarregados na estrada do Step 3

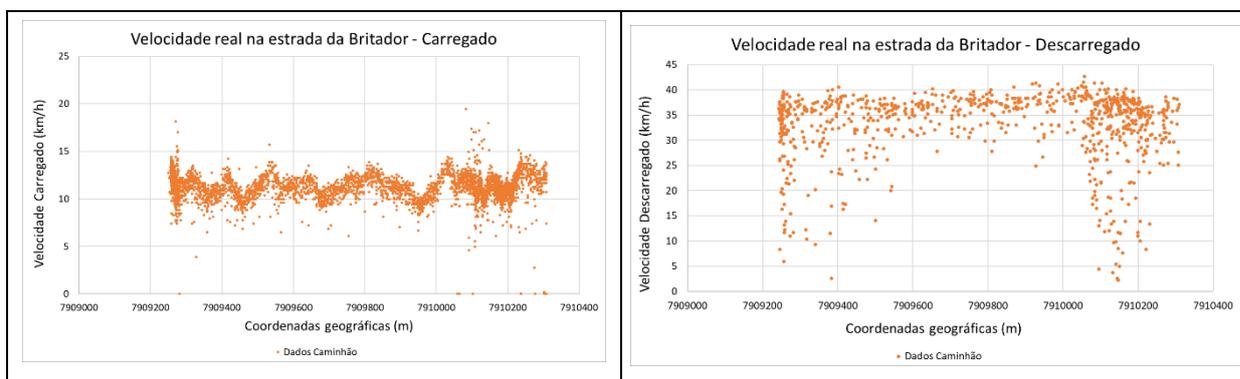


Figura 26 - Desempenho real dos caminhões carregados e descarregados na estrada do Britador

3.3 CORREÇÕES GEOMÉTRICAS

É importante entender e avaliar o impacto que pequenas alterações presentes nas camadas de revestimento podem implicar na velocidade das estradas. Nas Figura 27, Figura 28 e Figura 29 estão apresentados os perfis reais e ajustados da estrada. Por meio desses perfis reais levantados, representados pelas linhas vermelhas, foram propostas correções geométricas dessas vias, vistas por meio das linhas verdes (perfil ajustado), onde possível. Essas sugestões de adequações foram realizadas de maneira que não fossem necessárias grandes movimentações de material para ajustar a inclinação da estrada, e que se aproximassem ao projeto geométrico inicial.



Figura 27 - Perfil real (linha vermelha) e ajustado (linha verde) da Fase 4



Figura 28 - Perfil real (linha vermelha) e ajustado (linha verde) da estrada do Step 3

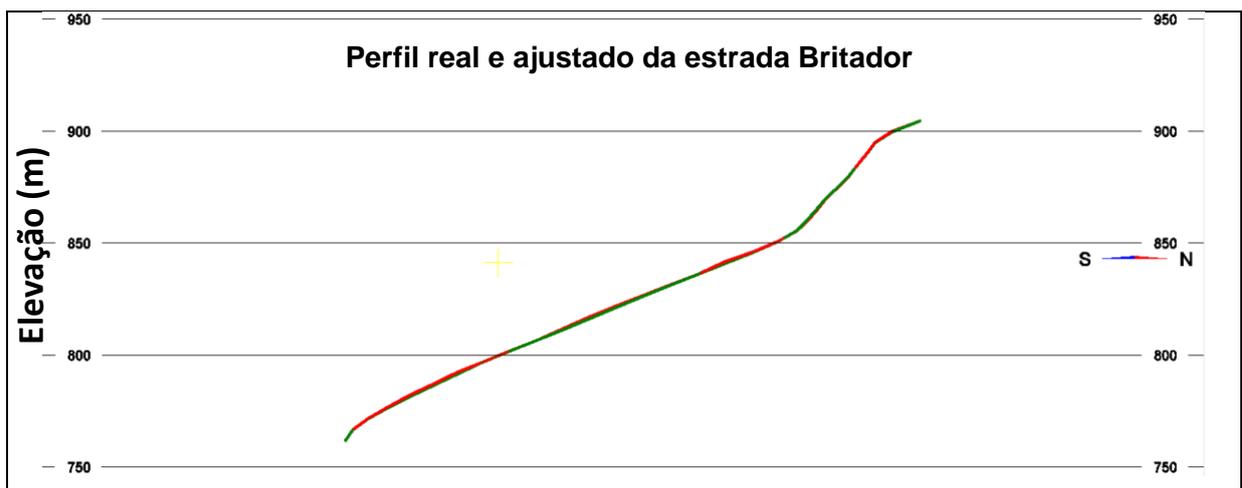


Figura 29 - Perfil real (linha vermelha) e ajustado (linha verde) da estrada do Britador

3.4 DEFINIÇÃO DE INDICADORES CHAVE PARA DESEMPENHO E AJUSTES NOS PERFIS LONGITUDINAIS DAS ESTRADAS

Para realizar as avaliações de sensibilidade foi utilizado novamente o software TALPAC da fornecedora RungePincokMinarco. Diante disso, foram utilizados dois parâmetros chave para estimar o impacto na velocidade dos caminhões:

- Variação da resistência ao rolamento;
- Variação da inclinação da estrada.

3.4.1 Análise de sensibilidade da variação da resistência ao rolamento

Para realizar a análise da resistência ao rolamento das estradas foi necessário identificar os principais defeitos dos trechos estudados que pudessem impactar essa resistência. Foi utilizada a tabela de inspeção visual de campo desenvolvido por Visser (2013), que por meio de pontuação para o grau e extensão dos defeitos identificados em campo (Tabela 6) permitiam, para cada trecho, correlacionar com a resistência ao rolamento naquela situação.

Uma vez obtida a resistência ao rolamento atual das estradas, foram feitas simulações considerando uma variação média de 1%, para mais e para menos. Essa análise possibilitou avaliar o impacto na velocidade quando ocorrem variações na resistência da estrada. Esses cenários foram rodados no simulador de frota TALPAC, utilizando os perfis de transporte atuais (originais) da mina e seus resultados estão apresentados no Capítulo 4.

3.4.2 Análise de sensibilidade da variação da inclinação da estrada.

Para fazer a avaliação da mudança na inclinação das estradas, foi escolhida a estrada da Fase 4, pois se mostrou ser a via que permitiria realizar alterações mais significativas em sua geometria. Foram redesenhados trechos das estradas, destacado na Figura 30, reduzindo a inclinação dos acessos de uma média de 10% para 9% e 8%. Essas novas propostas foram novamente simuladas para se determinar a sua velocidade e o impacto na movimentação necessária para adequar as vias para essa nova realidade. Em ambas simulações, foram propostas recorrências nos taludes existentes.

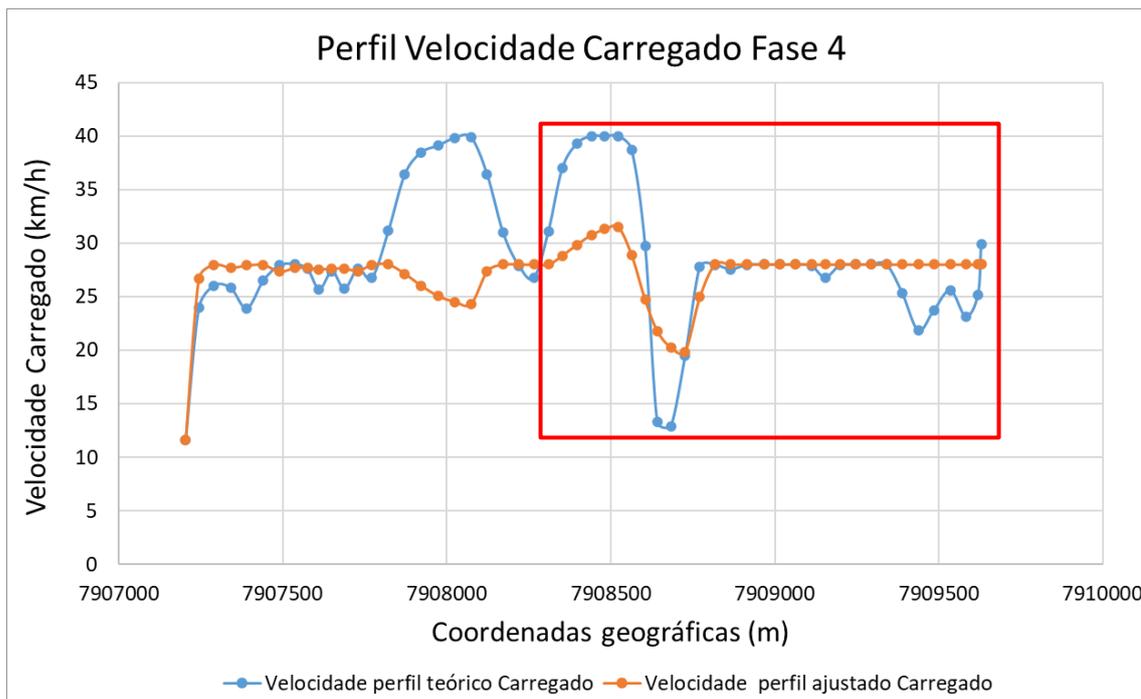


Figura 30 - Perfil de velocidade do trecho estudado para variação da inclinação

3.5 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO USO DOS REGISTROS DE PRESSÃO DA SUSPENSÃO DOS CAMINHÕES PARA DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS NAS ESTRADAS

Para a avaliação do potencial uso dos registros de pressão da suspensão dos caminhões, foi realizado o levantamento das coordenadas geográficas dos defeitos identificados visualmente à medida que se percorriam essas estradas. Para esse estudo, foram priorizadas as deformações nas vias, causadas por problemas de dimensionamento e execução dos projetos estruturais e funcionais. Esses defeitos foram levantados e enumerados nas duas principais estradas da mina, denominadas estrada da Fase 4 e estrada Step 3, no sentido de transporte carregado e descarregado dos caminhões. Na Figura 31 (a), os pontos em laranja, variando de 20 a 31 e 51 a 68 representam os defeitos levantados na pista quando os caminhões estavam se deslocando carregados, enquanto que os pontos em azul na Figura 31 (b), variando de 1 a 19 e 46 a 50, representam os defeitos quando os caminhões se deslocavam descarregados.

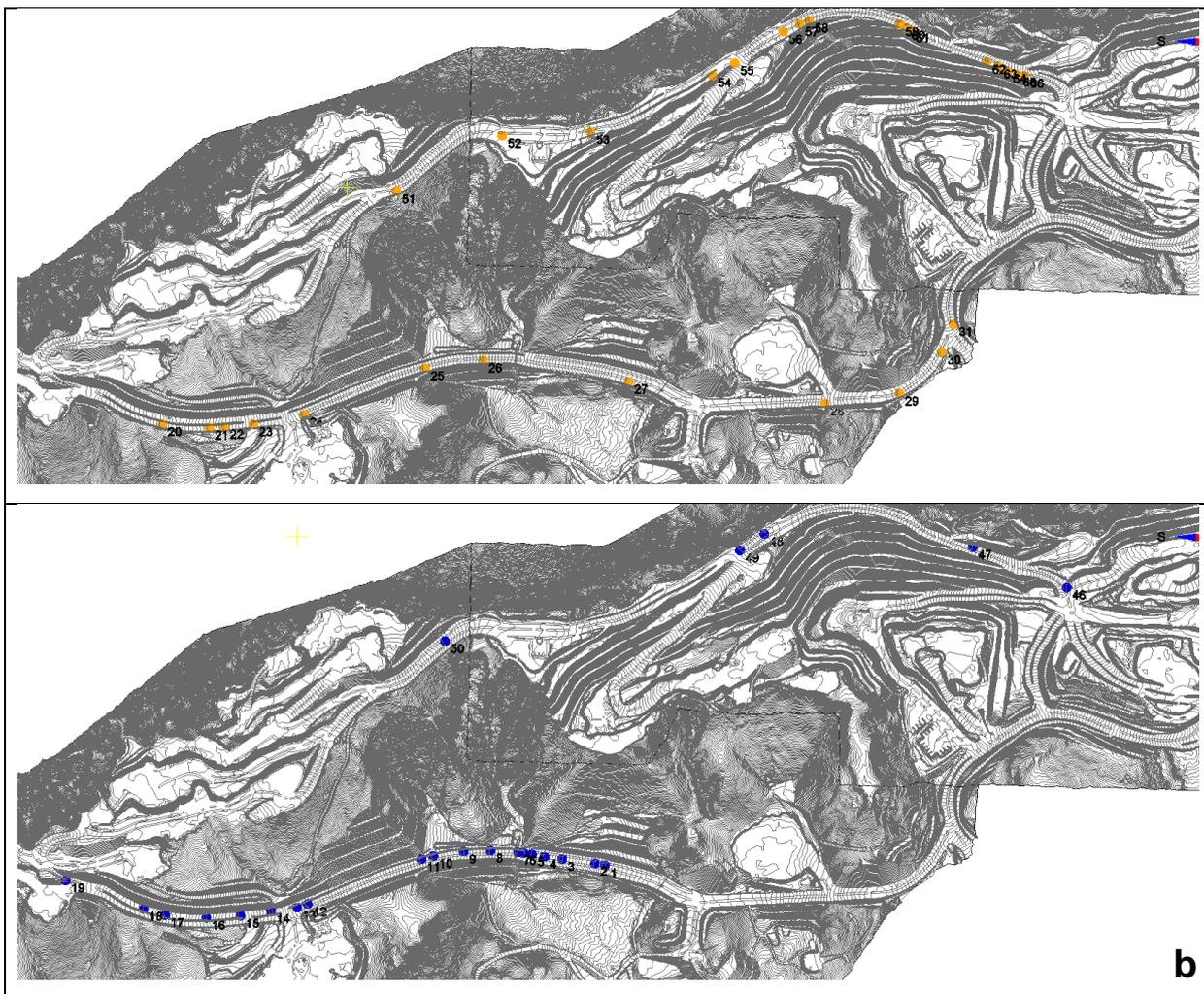


Figura 31 - Defeitos (deformações) nas estradas durante inspeção visual caminhão carregado (a) caminhão descarregado (b)

A variação da pressão nas suspensões, levantada por meio da leitura dos sensores que o sistema de monitoramento em tempo real coleta, poderia auxiliar na identificação dos defeitos por meio de um limite estabelecido quando a variação da pressão o alcançasse. Essa variação, alcançando um limite estabelecido, sinalizaria a central de monitoramento, que imediatamente informaria à equipe de infraestrutura de mina sobre o evento. Para a análise, foram coletados dados durante três horas de tráfego de três caminhões escolhidos aleatoriamente. Nessa coleta foram capturados registros das quatro suspensões do caminhão, duas dianteiras e duas traseiras.

Os registros dos defeitos levantados em campo foram feitos de tal forma que o tempo da coleta dos dados no sistema de monitoramento estivessem dentro do mesmo intervalo, fazendo assim com que os dados coletados pudessem refletir as

observações realizadas em campo. A não sincronia desses levantamentos poderia incorrer em alterações nas estradas devido as manutenções das vias que acontecem durante todo o turno. Após a coleta dos dados do sistema e juntamente com os levantados em campo, foram feitas análises para identificar o potencial uso dos registros e se esses apresentavam uma correlação direta para identificar os defeitos. As análises dos dados e comparação com os defeitos mapeados em campo serão apresentadas no Capítulo 4, que trata das avaliações qualitativas e quantitativas derivadas da aplicação do método sugerido.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados durante esse capítulo os resultados e análises feitas durante a avaliação de defeitos em estradas de transporte utilizando a variação de velocidade. Além disso, são demonstrados os efeitos na velocidade das estradas selecionadas, uma vez proposta a correção dos defeitos geométricos e melhoria na resistência ao rolamento. Finalmente, compara-se a velocidade da estrada e movimentação de material necessário para reduzir a inclinação atual das vias de 10% para 9% e 8%.

4.1 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

O levantamento feito através da sistemática de inspeção visual em campo para identificação dos defeitos em acesso permitiu avaliar as cinco principais causas para o aumento da resistência ao rolamento das estradas não pavimentadas. As deformações e trilha de rodas foram os mais presentes nos acessos da mina, o que sugere uma necessidade de revisar os projetos de construção da base e sub-base dessas vias. As corrugações, material solto na pista e o caráter pedregoso das estradas foram identificados com menor grau de severidade e extensão nos acessos. Na Tabela 8, podem ser vistos alguns registros dos defeitos encontrados durante a inspeção visual das estradas.

Tabela 8 - Defeitos identificados e avaliados nas estradas

Defeito	Registro Visual
Deformações	
Material solto na pista	
Corrugações	
Trilha de pneus	

Tendo-se uma velocidade média de 25 km/h nessas vias, a resistência ao rolamento que essas estradas oferecem aos equipamentos é de aproximadamente 3.5% e representam aproximadamente 55% de toda extensão de estrada estudada. Na

Figura 32 é possível observar que em determinados trechos das estradas, destacado em vermelho, oferecem uma resistência ao rolamento superior a 4.1%, principalmente na estrada da Fase 4. Na estrada do britador, apresenta uma pequena extensão de resistência ao rolamento fora dos valores recomendados. Esse trecho tem forte impacto devido ao grande fluxo de caminhões vindos da estrada do Step3, estrada da Fase 4 e retomada de minério dos estoques em direção ao britador. No geral, esses trechos representam 9,2% de toda extensão de estrada analisada. Finalmente, destaca-se em verde alguns trechos em que a resistência ao rolamento apresenta valores bem próximos ao ideal para estradas não pavimentadas, em torno de 2.5% a 3%, representando 35.9% de toda extensão de estrada.

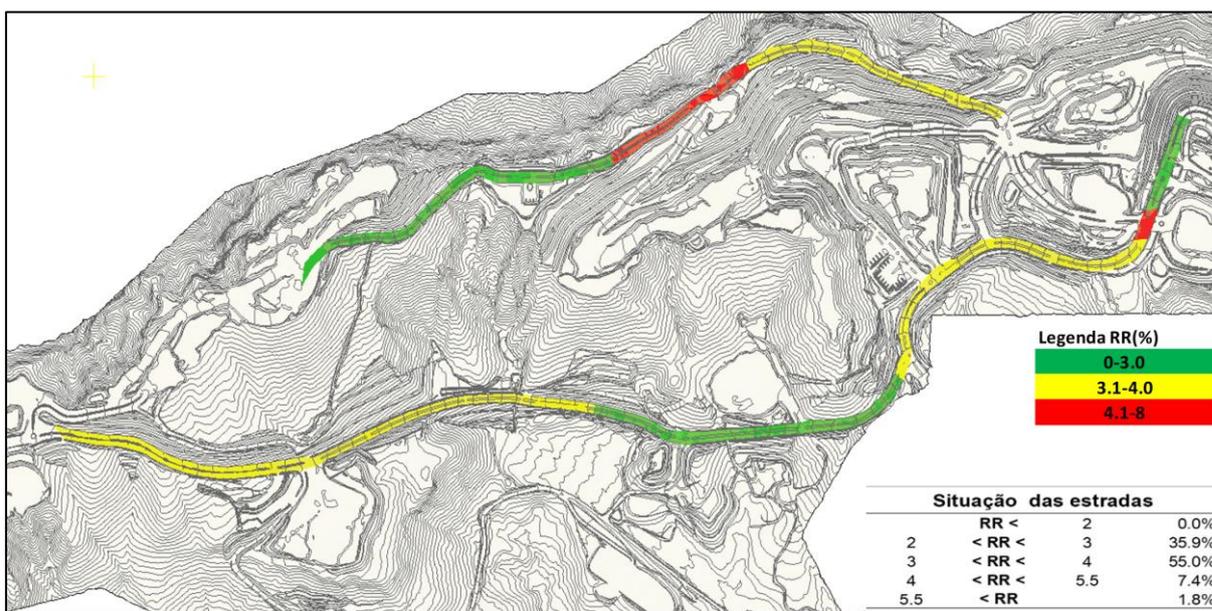


Figura 32 - Situação da resistência ao rolamento das estradas

4.2 CÁLCULO TEÓRICO DA VELOCIDADE ATUAL DAS VIAS

A velocidade ponto a ponto de cada estrada, obtida pelo *software* de dimensionamento, mostra, através da velocidade, pequenas variações na declividade ou de resistência ao rolamento ao longo do acesso que influenciam negativamente na condução contínua dos caminhões sobre essas vias.

Para o perfil de velocidade da estrada do Step 3, visto na Figura 33, observa-se que em aproximadamente 1.5 km de pista no trecho 2, a variação na inclinação faz com

que os caminhões precisem constantemente alternar entre a frenagem e aceleração para se adequar às condições de inclinação da via. Essa variação é mais perceptível quando os caminhões estão trafegando com carga. A análise do perfil de velocidade, quando os caminhões estão descarregados, mostra impactos menores na velocidade ocasionadas por esses defeitos.

A velocidade calculada para a estrada do Step 3, quando os caminhões trafegam com carga, é de 23,51 km/h e 28,91 km/h, quando esses estão descarregados.

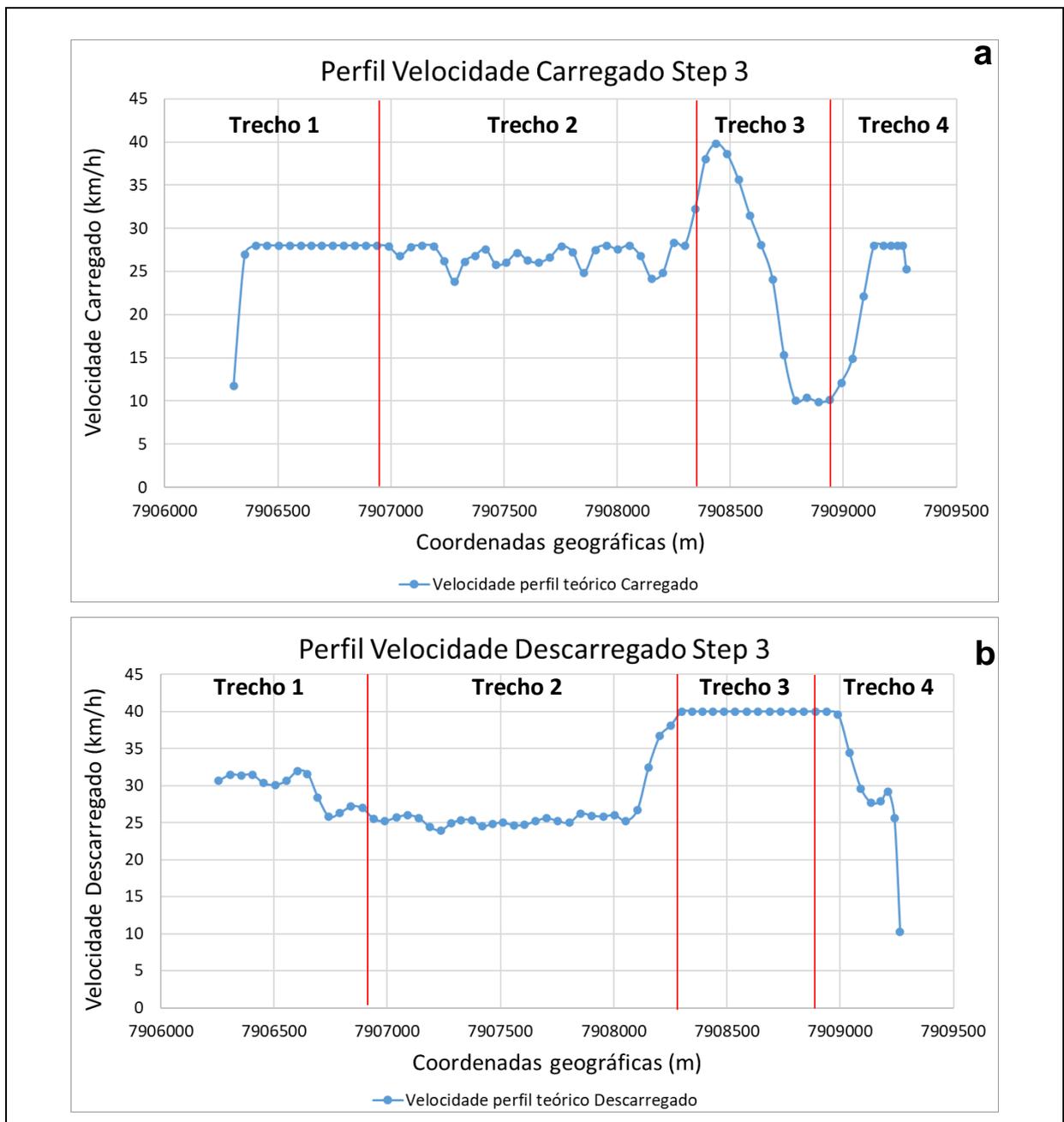


Figura 33 - Perfil de velocidade simulado para as vias atuais da estrada da Step 3 Carregado (a) Descarregado (b)

O perfil de velocidade da estrada da Fase 4, visto na Figura 34, apresentou variação em dois trechos, o trecho 1 com extensão de 600 m e o trecho 2 com 1000 m. A velocidade média calculada para toda a estrada da Fase 4, quando os caminhões trafegam com carga é de 26,93 km/h e 29,32 km/h, quando esses estão descarregados.

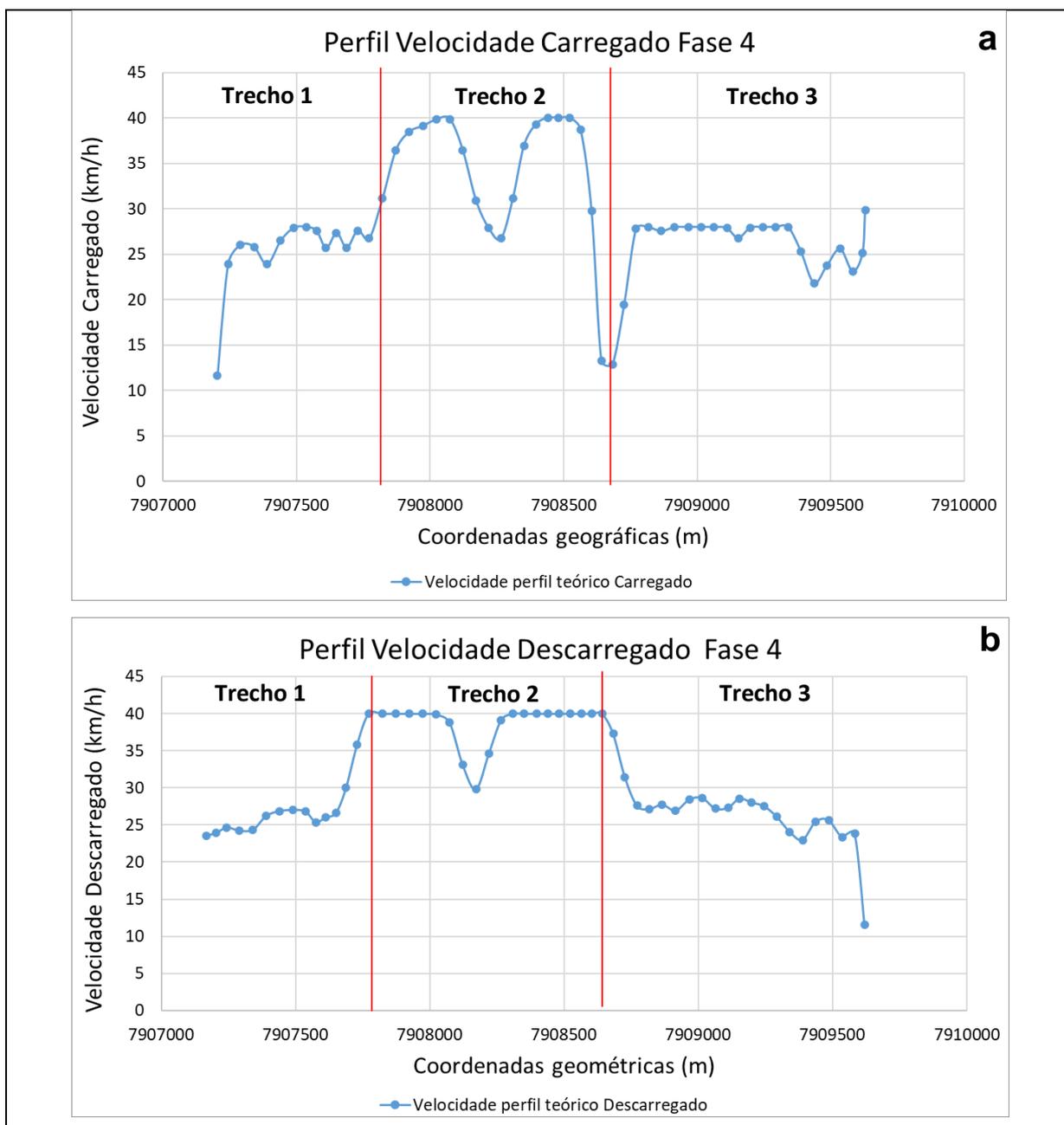


Figura 34 - Perfil de velocidade simulado para as vias atuais da estrada da Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)

O perfil de velocidade carregado da estrada do Britador, Figura 35(a), é o que apresentou variação em ambos os trechos, totalizando 1650 m, isso mostra as

constantes alternâncias entre frenagens e aceleração que os caminhões precisam fazer quando carregados. Essas mudanças de marchas contribuem para redução na qualidade de condução, aumento do desgaste da camada de revestimento, danos nos pneus e perda de produtividade.

Ao observar o perfil de velocidade na Figura 35(b), quando descarregado, o caminhão não precisa mudar de marcha com tanta frequência, podendo manter a velocidade constante ao longo da via. A velocidade calculada para a estrada do Britador quando os caminhões trafegam com carga é de 10,87 km/h e 36,61 km/h quando esses estão descarregados.

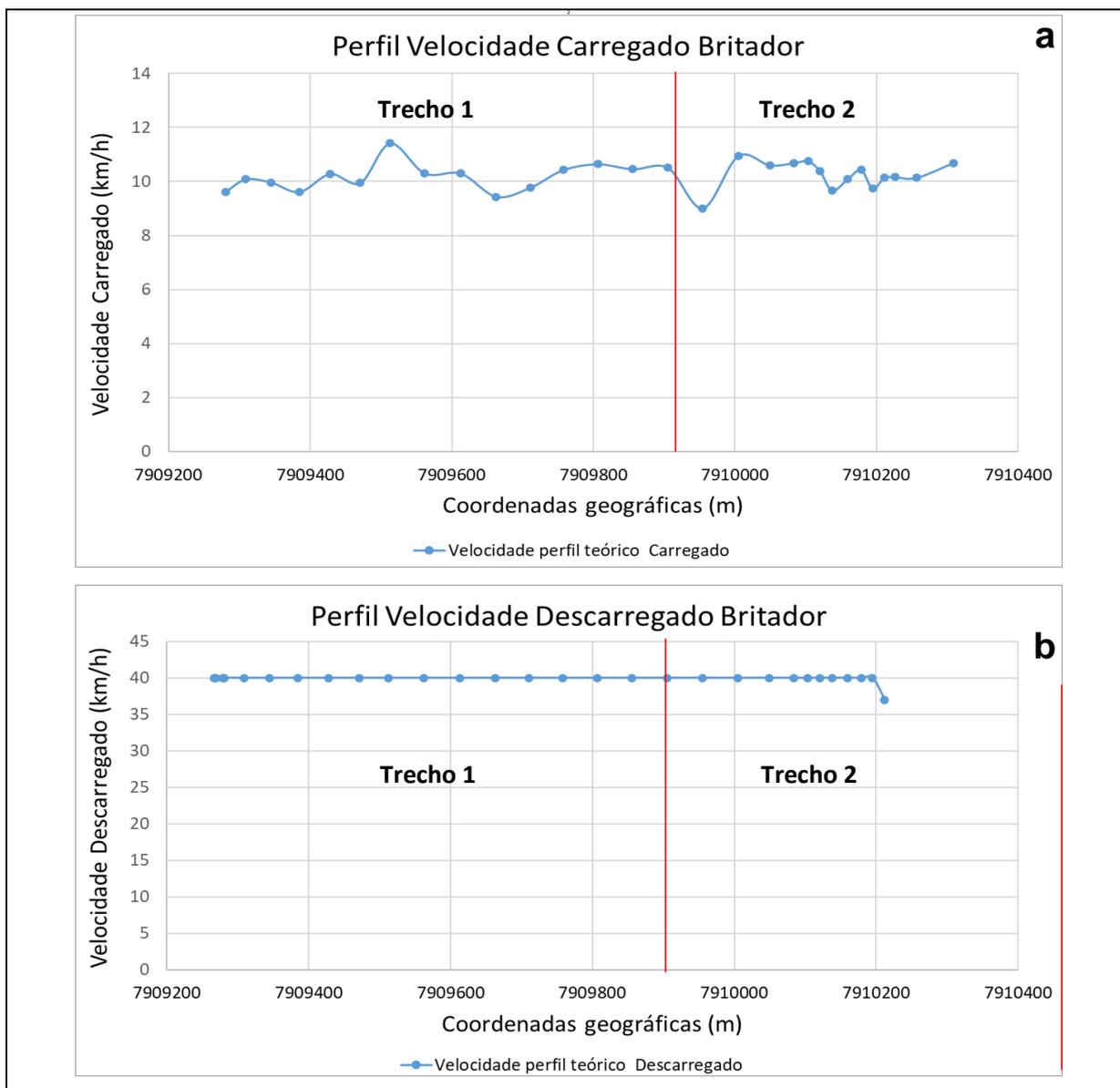


Figura 35 - Perfil de velocidade simulado para as vias atuais da estrada do Britador (a) Carregado (b) Descarregado

4.3 COMPARATIVO DA VELOCIDADE TEÓRICA DAS VIAS E A PRATICADA NA MINA

Os dados coletados durante a fase de estudo mostraram que, para a estrada da Fase 4, no trecho 2, a curva teórica proposta não está representando a velocidade desenvolvida pelos caminhões carregados. Esse trecho apresenta uma variação na inclinação muito alta em seus 500 metros de pista, forçando os caminhões a manter a velocidade abaixo do valor esperado (curva azul). Para os demais trechos dessa estrada, a curva teórica apresentou um deslocamento da velocidade carregado (Figura 36 (a)) em aproximadamente 3 km/h a menos, enquanto que, para o trecho

de volta (Figura 36 (b)), com os caminhões descarregados, os dados estão relativamente aderentes à curva teórica estimada de velocidades esperadas.

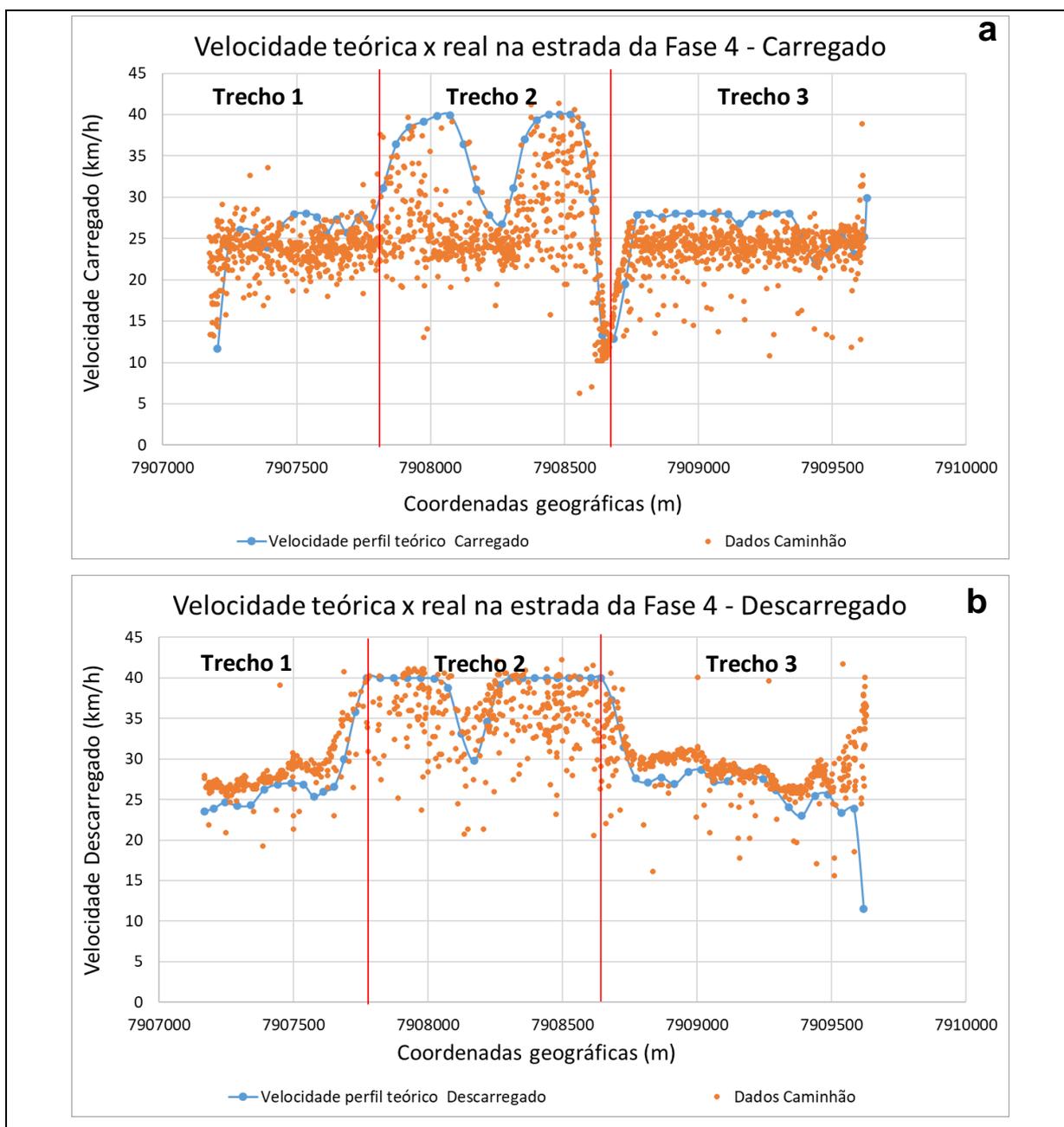


Figura 36 - Comparativo da curva de velocidade teórica com os dados de campo da estrada da Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)

Para o trecho da estrada do Step 3, Figura 37(a), a curva teórica para o perfil carregado apresentou novamente um deslocamento de 2.5 km/h a mais nos 2500 m de pista em relação aos dados coletados em campo. No restante da estrada, aproximadamente 1100 m, a curva se mostrou aderente aos dados observados em campo. Comparando-se o trecho descarregado na Figura 37(b), os dados

observados em campo ficaram bem aderentes à curva teórica simulada, com um leve deslocamento negativo.

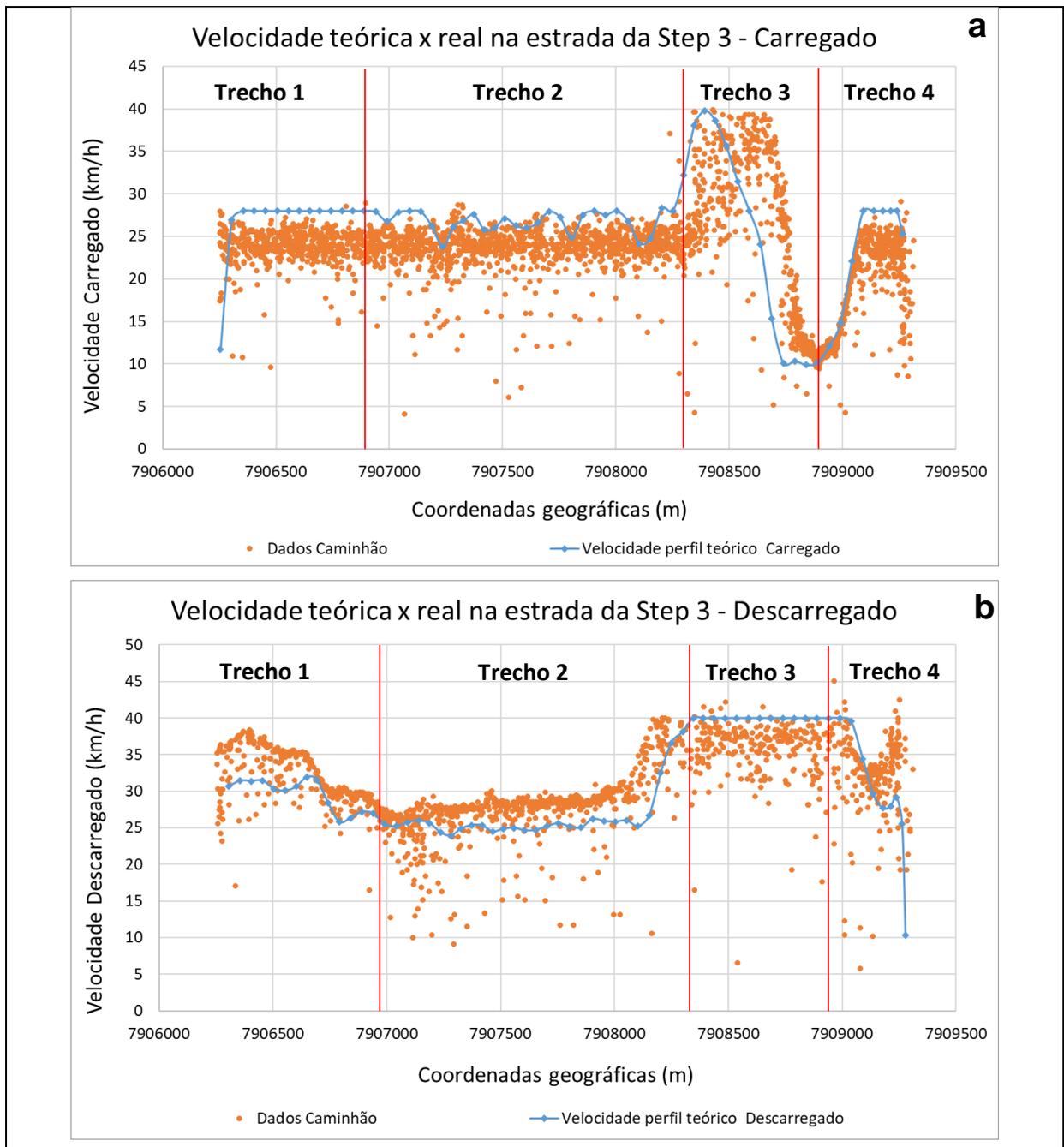


Figura 37 - Comparativo da curva de velocidade teórica com os dados de campo da estrada Step 3 Carregado (a) Descarregado (b)

Finalmente, para o trecho da estrada do britador, os dados levantados em campo, vistos na Figura 38(a), para o perfil carregado, apresentou uma aderência muito próxima à curva teórica. Comparando-se o trecho descarregado na Figura 38(b), observa-se uma maior dispersão das velocidades do caminhão carregado no retorno da britagem.

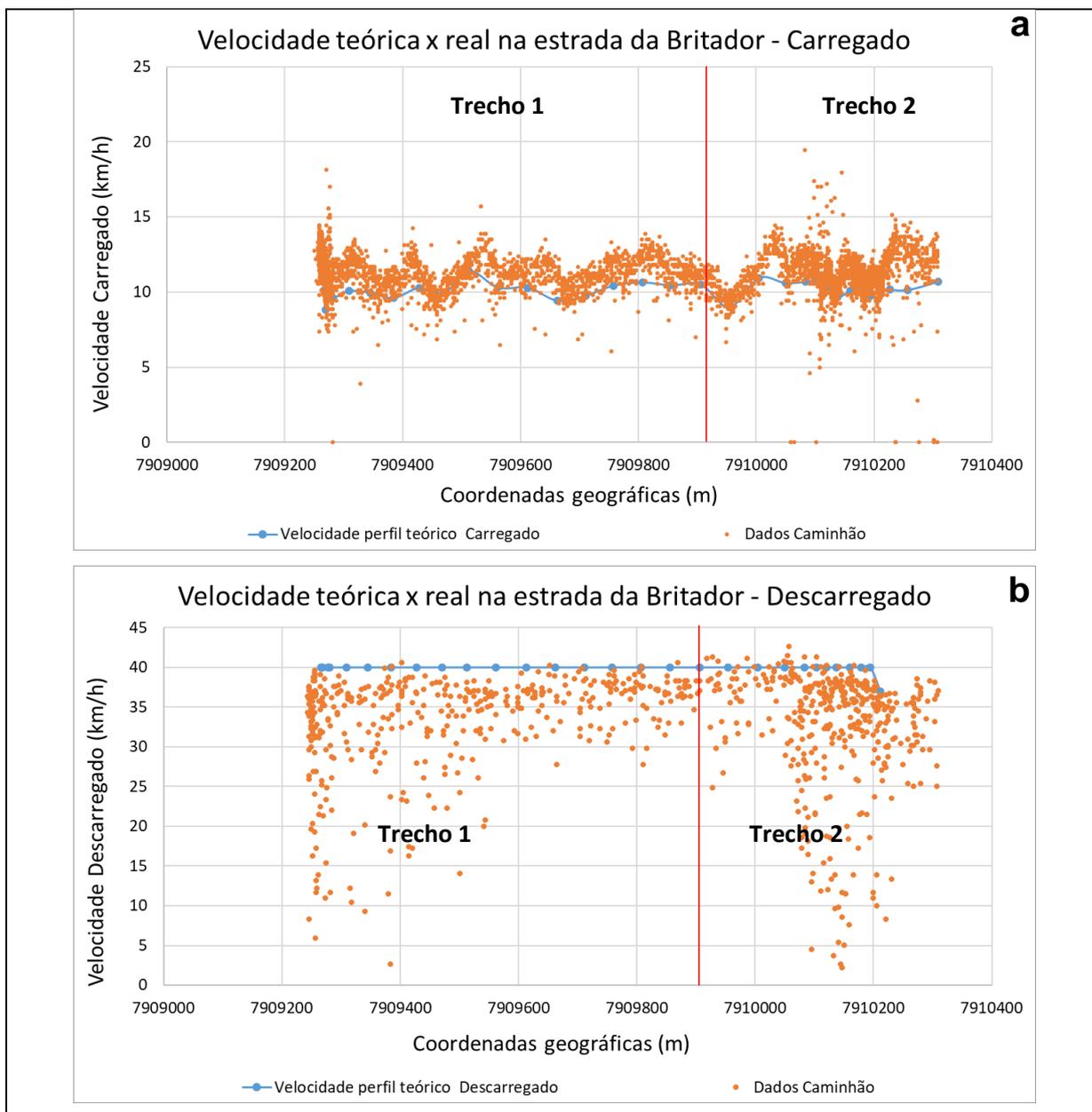


Figura 38 - Comparativo da curva de velocidade teórica com os dados de campo da estrada do Britador Carregado (a) Descarregado (b)

4.4 CORREÇÕES GEOMÉTRICAS

As correções geométricas realizadas nos acessos foram feitas de tal forma que houvesse a menor movimentação de material na camada de revestimento ou até mesmo na camada de sub-base. Essa variação em cota, ficou em média de 0,5 a 1,0 metro de corte ou aterro em determinados trechos de cada estrada.

Avaliando-se a estrada do Step 3, houve um incremento na velocidade de aproximadamente 3.6% para o trecho 2 (Figura 39(a)) com maior variação na

inclinação. A velocidade do caminhão carregado simulada para o trecho destacado é de 26,8 km/h, após os ajustes da inclinação, essa velocidade subiu para 27,8 km/h. Quando analisado o trecho de volta, descarregado, o ajuste feito no acesso manteve praticamente a velocidade simulada da via atual de 26,1 km/h, Figura 39(b). Demais trechos da estrada, não apresentaram ganhos ou perdas significativos na velocidade simulada no perfil atual.

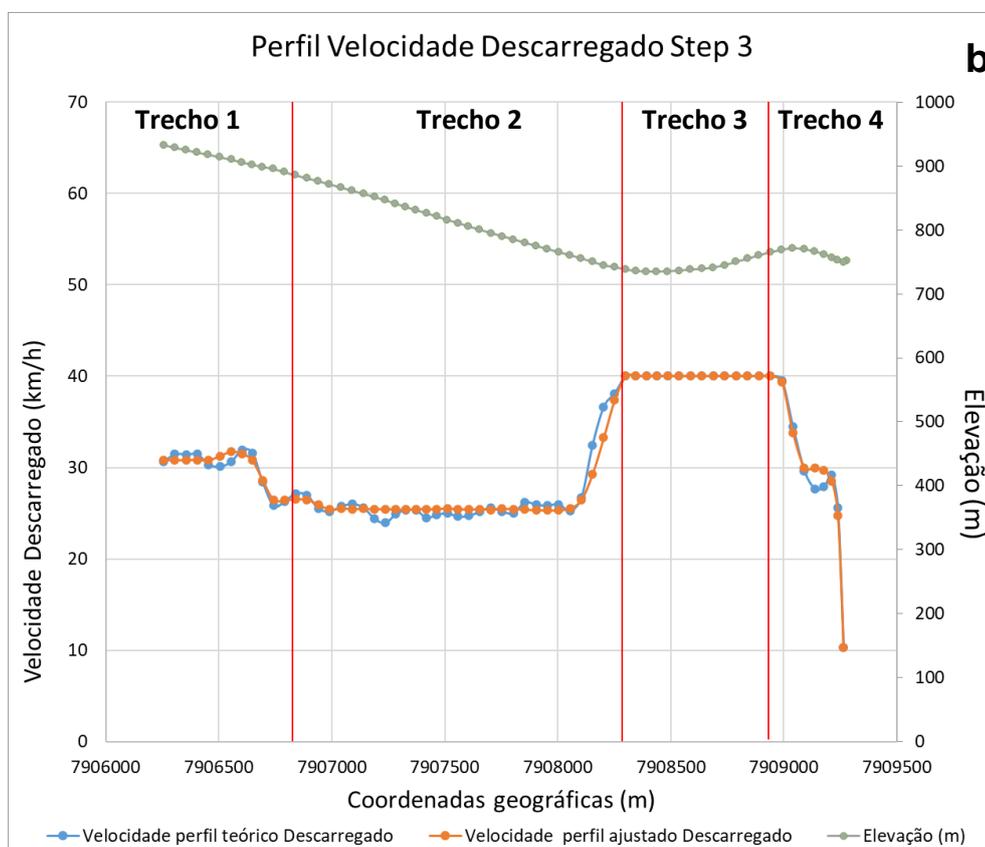
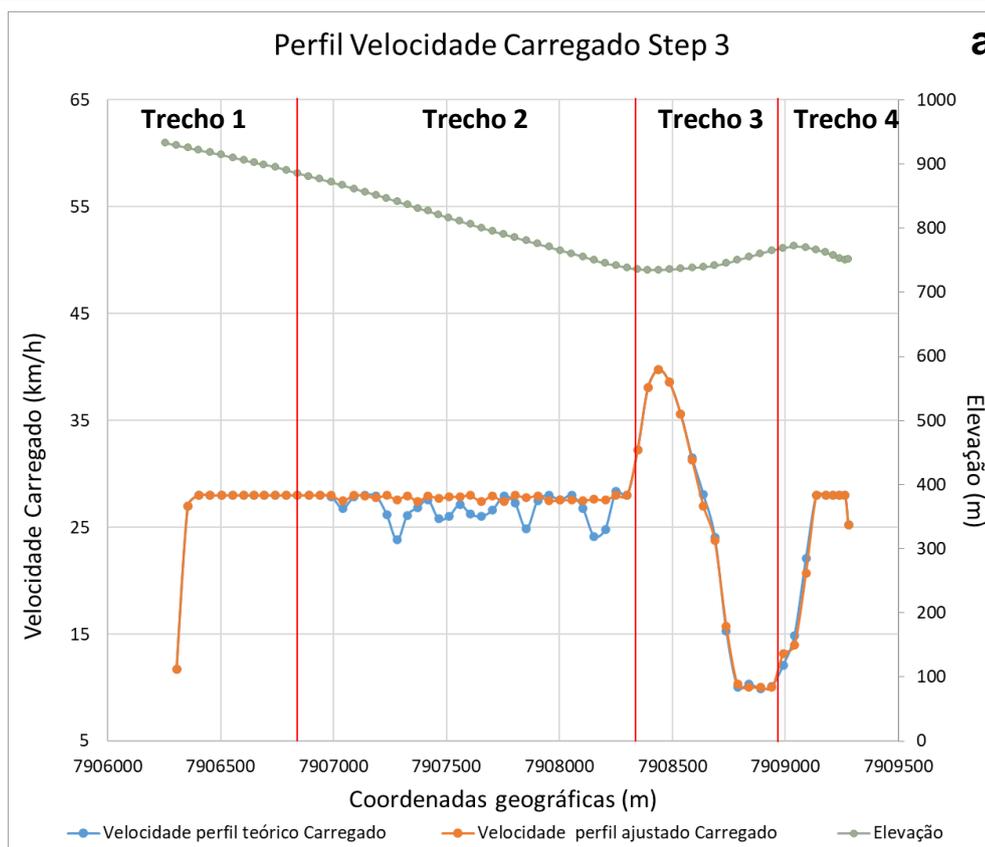


Figura 39 - Perfil de velocidade ajustado para a estrada do Step 3 Carregado (a) Descarregado (b)

A estrada da Fase 4 obteve uma melhoria na velocidade nos trechos 1 e 3. Em relação ao perfil teórico simulado, essa melhoria foi de aproximadamente 4.1% e 6,9% para sentido carregado (Figura 40(a)) e 1.55% e 4.66% para descarregado (Figura 40(b)). Na estrada da Fase 4, no trecho 2, destacado em amarelo, houve uma redução na velocidade quando comparado aos perfis ajustado e teórico. Conforme visto na Figura 36 do tópico 4.3, a velocidade praticada atualmente pelos caminhões não se comportou conforme a curva teórica projetada para esse trecho. Esse possui uma inclinação muito alta, acima de 11% em curta extensão, sendo necessário redesenhar esse trecho para no máximo 10% de inclinação.

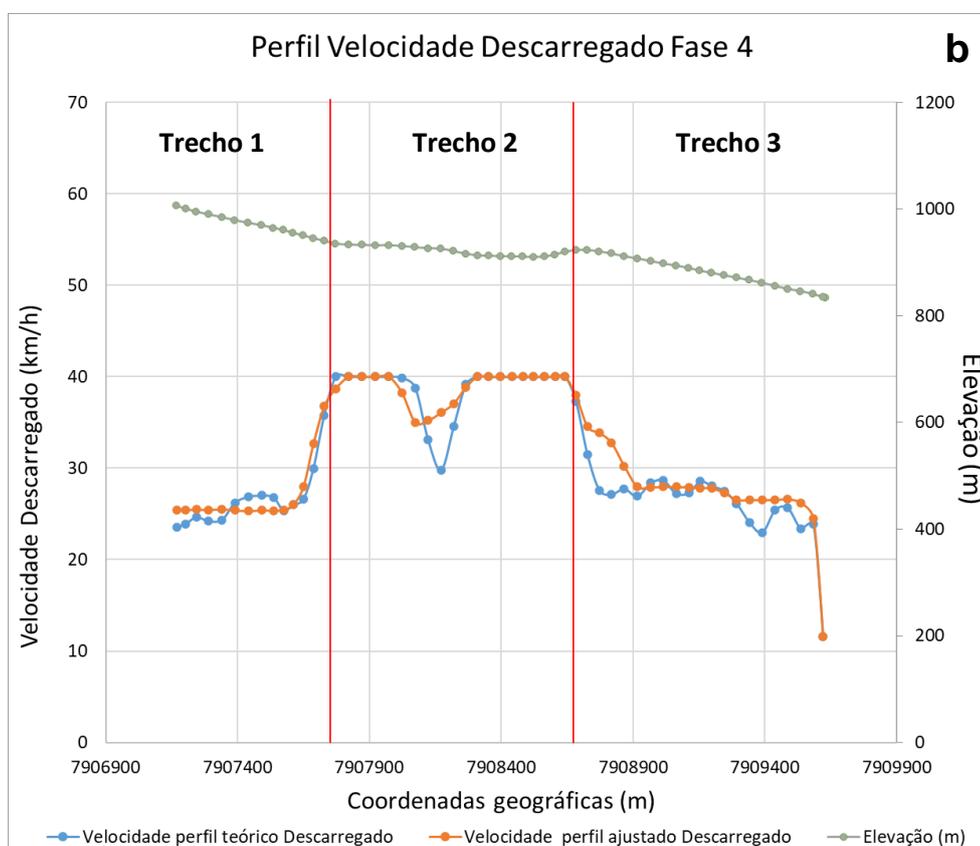
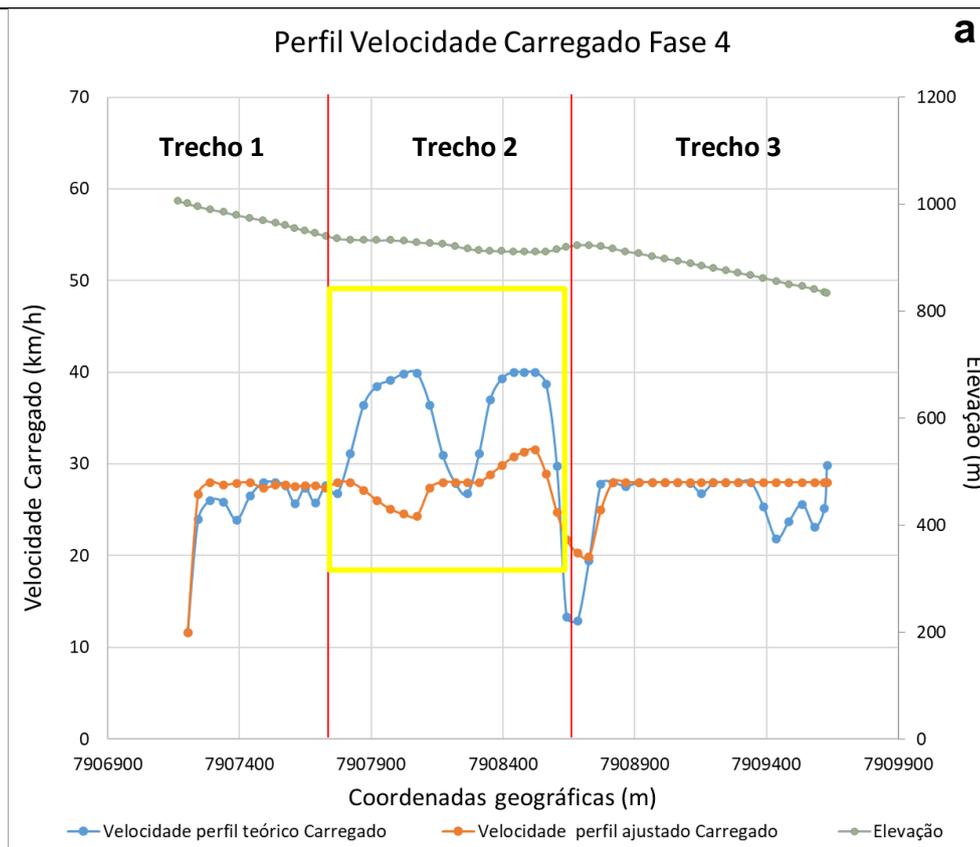


Figura 40 - Perfil de velocidade ajustado para a estrada do Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)

A estrada do britador (Figura 41 (a e b)) não obteve, em termos de velocidade, ganhos significativos tanto para a velocidade do caminhão carregado quanto descarregado. A velocidade média carregado antes e após o ajuste geométrico ficou em aproximadamente 10,2 km/h e 36,6 km/h quando descarregado.

Mesmo não havendo ganhos significativos na velocidade média da estrada do britador, o ajuste geométrico permitiu ganhos relacionados à redução no desgaste da camada de revestimento, uma vez que acelerações e frenagens constantes têm impacto direto na camada de revestimento da via.

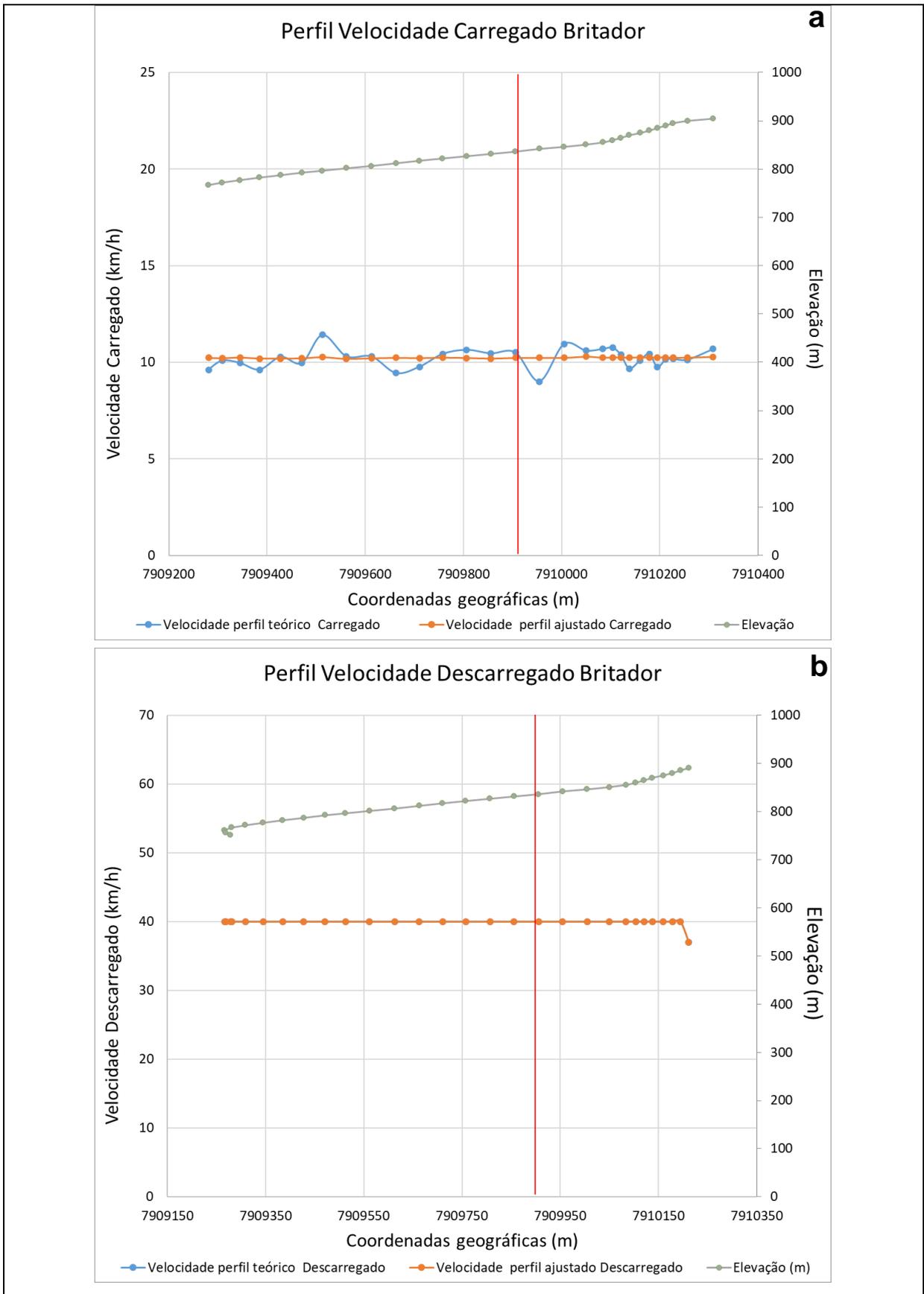


Figura 41 - Perfil de velocidade ajustado para a estrada Britador Carregado (a) Descarregado (b)

Nas tabelas 9 e 10 é possível observar as variações das velocidades em cada trecho das estradas estudadas. Essas velocidades refletem a velocidade teórica das estradas na data do estudo e o resultado obtido após o ajuste geométricos ao longo da estrada.

Tabela 9 - Quadro resumo de correção geométrica das estradas - Caminhão Carregado

Estrada	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4
Step 3 Teórico	25,2	26,8	19,7	19,5
Step 3 Ajustado	25,2	27,8	19,7	19,4
Fase 4 Teórico	24,2	32,3	25,1	
Fase 4 Ajustado	25,2	27,3	27,0	
Britador Teórico	10,2	10,2		
Britador Ajustado	10,2	10,3		

Tabela 10 - Quadro resumo de correção geométrica das estradas - Caminhão Descarregado

Estrada	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4
Step 3 Teórico	29,6	26,1	40,0	27,3
Step 3 Ajustado	29,7	26,1	40,0	27,5
Fase 4 Teórico	26,3	38,6	25,5	
Fase 4 Ajustado	26,7	38,9	26,7	
Britador Teórico	40,0	39,9		
Britador Ajustado	40,0	39,9		

4.5 AVALIAÇÃO DE ASPECTOS FUNCIONAIS E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Os resultados para a variação dos aspectos funcionais e parâmetros geométricos das vias podem ser observados nos tópicos seguintes. Essas variações consistiram em simular o comportamento da velocidade dos caminhões quando houvesse variações na resistência ao rolamento e declividade das estradas.

4.5.1 Análise da Variação da resistência ao rolamento

Os resultados obtidos pela resistência ao rolamento são mais bem visualizados nos trechos das estradas que apresentam maiores inclinações, uma vez que em trechos relativamente planos o caminhão tem a capacidade de alcançar o limite máximo da via. A estrada do Step 3, visto na Figura 42, apresentou para inclinação de 2.5% uma redução na velocidade da estrada em 2,38% comparado com a velocidade teórica simulada em 3.5% de resistência ao rolamento. Apesar da melhoria na

resistência ao rolamento, nesse caso, os caminhões precisam utilizar mais frenagem, uma vez que a via não oferece uma maior força contrária durante a descida do caminhão. Ainda que esta velocidade tenha sido reduzida, tem-se o ganho em menor desgaste dos pneus. Quando analisada a velocidade dos caminhões subindo carregado, a velocidade já começa a demonstrar o impacto que a resistência ao rolamento oferece ao caminhão, uma vez que ao subir o acesso, ele precisa vencer esse incremento de resistência.

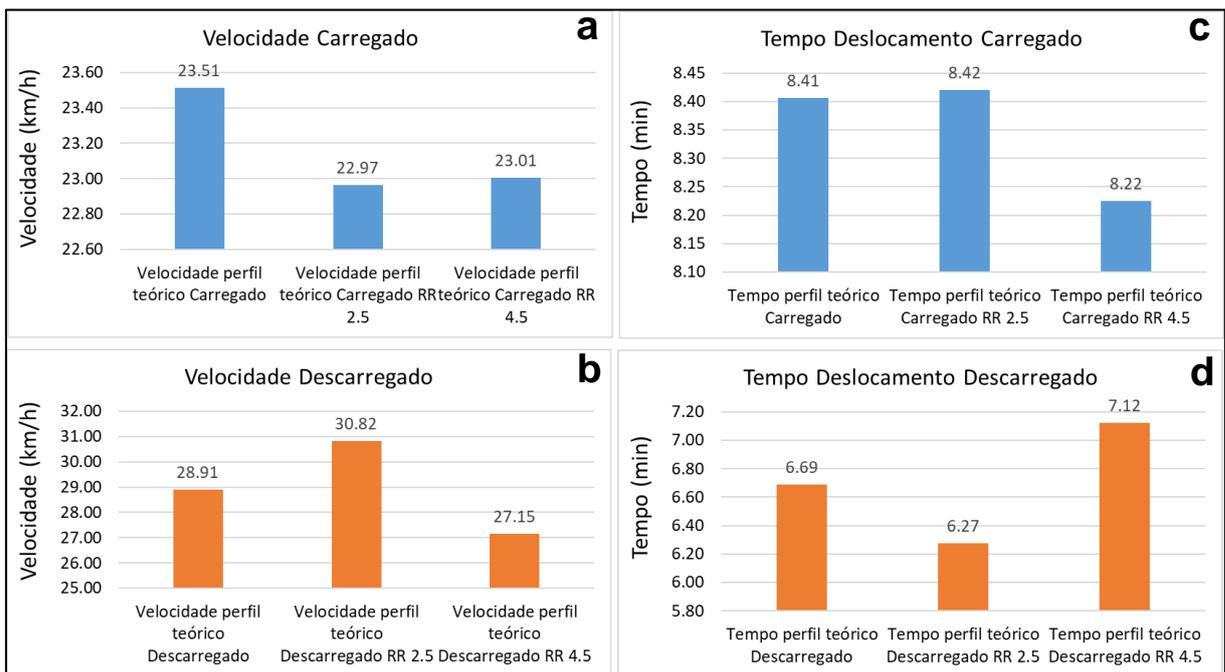


Figura 42 - Comparativo de Velocidade Carregado (a) Descarregado (b) e tempo de deslocamento do caminhão na estrada Carregado (c) Descarregado (d) para a estrada do Step 3

Na Figura 43, observa-se o impacto do incremento ou redução de 1% de inclinação nos acessos ponto a ponto em cada trecho da estrada. Em trechos razoavelmente planos, não há incremento ou decréscimo na velocidade, uma vez que o caminhão consegue atingir o máximo de velocidade permitido.

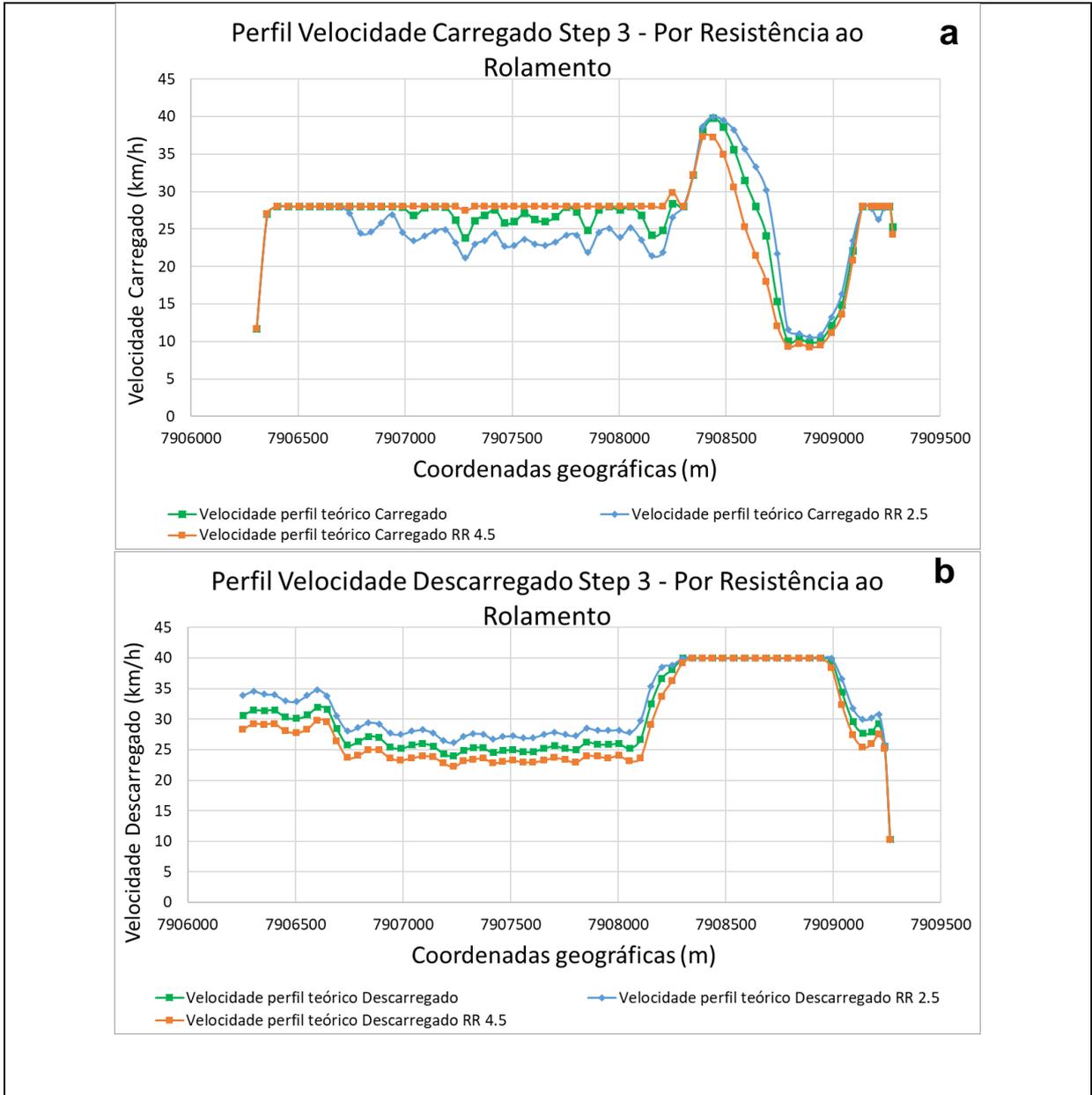


Figura 43 - Perfil de velocidade para variação de resistência ao rolamento da estrada do Step 3 Carregado (a) Descarregado (b)

A estrada da Fase 4, para a declividade de 2.5%, apresentou uma velocidade inferior à velocidade teórica simulada da via, com 3.5% de resistência ao rolamento quando o caminhão está carregado (Figura 44).

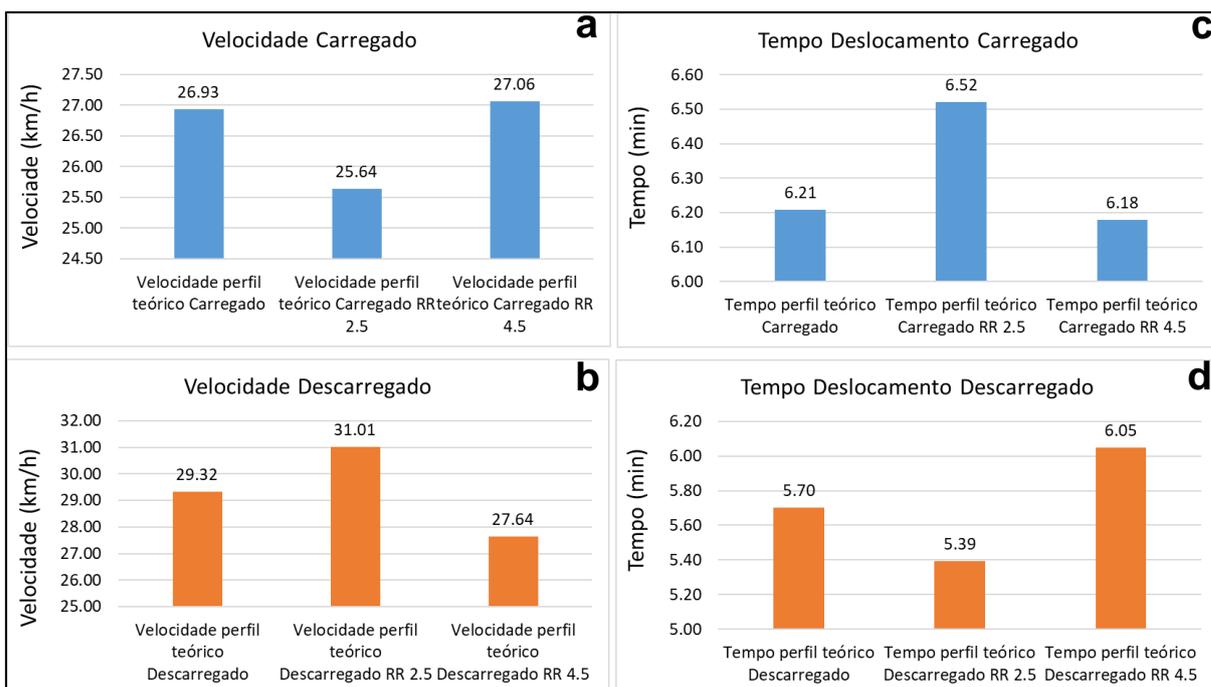


Figura 44 - Comparativo de Velocidade Carregado (a) Descarregado (b) e tempo de deslocamento do caminhão na estrada Carregado (c) Descarregado (d) para a estrada da Fase 4

Na Figura 45 observa-se o impacto que o incremento ou redução de 1% de resistência ao rolamento nos acessos ponto a ponto em cada trecho da estrada. Em trechos razoavelmente planos, a variação da resistência ao rolamento não apresenta um incremento ou decréscimo na velocidade, uma vez que o caminhão conseguiu atingir o máximo de velocidade permitido.

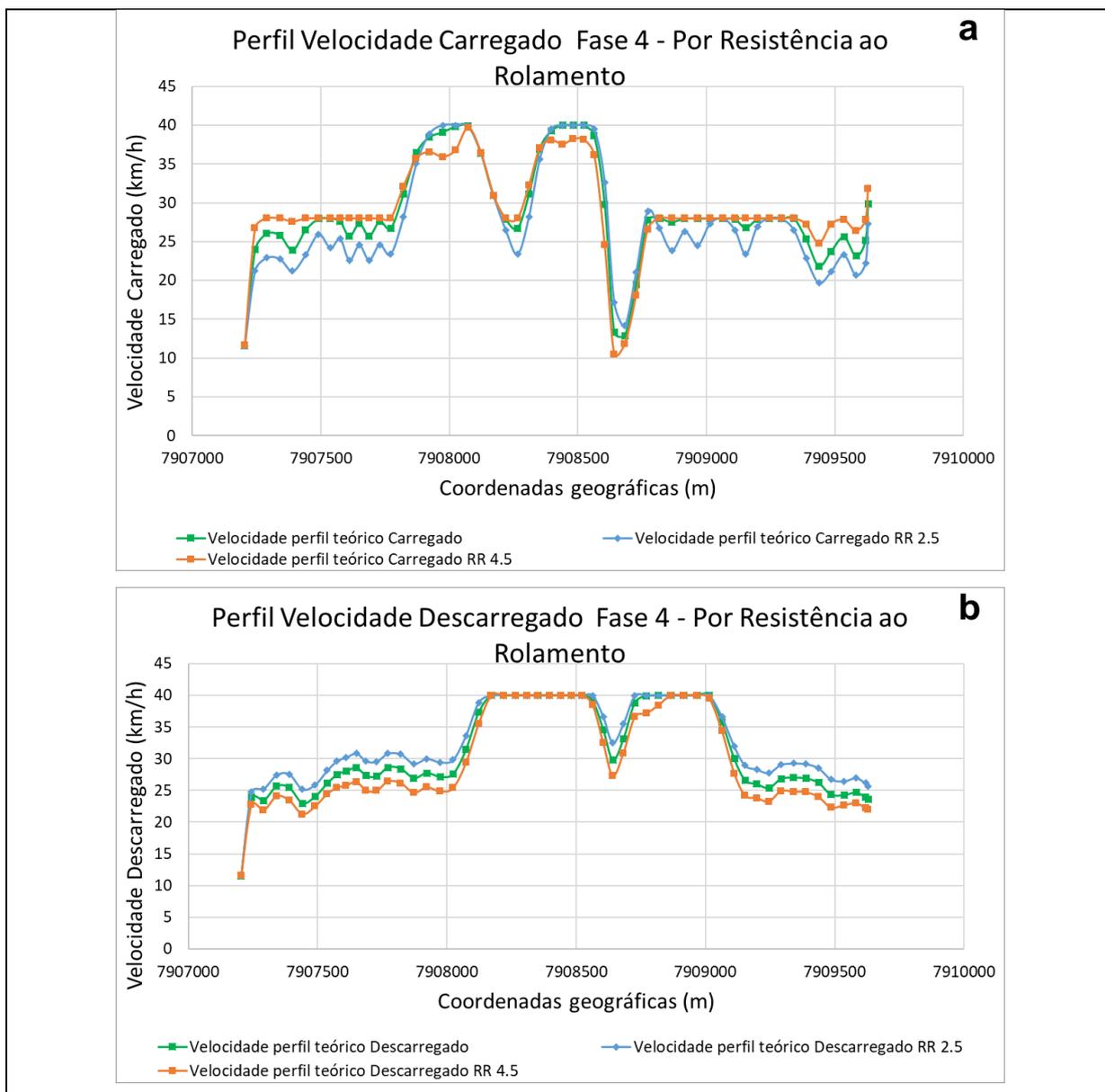


Figura 45 - Perfil de velocidade para variação de resistência ao rolamento da estrada do Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)

A estrada do britador demonstrou um comportamento inverso do observado nas duas outras estradas em função do sentido de transporte do material carregado e descarregado. Na Figura 46 é possível verificar a variação de velocidade e tempo de deslocamento para cada variação na inclinação da pista. Uma melhoria da resistência ao rolamento atual da estrada em 1%, tem um impacto positivo na velocidade de aproximadamente 6,59%. Esse impacto é explicado devido a via oferecer menor resistência ao caminhão passar, fazendo com que ele não precise exercer força adicional. A pista, ao se degradar, atingindo uma resistência ao rolamento de 4,5%, fez com que a velocidade reduzisse 7,19% e tempo de ciclo aumentasse em torno de 6.71%. Essa mesma estrada, observando o perfil de

velocidade descendo descarregado, retornando para as frentes de lavra, a melhoria ou aumento na resistência ao rolamento não foram suficientes para provocar uma redução na velocidade da via. Lembrando-se que a velocidade máxima permitida na mina é de 40 km/h.

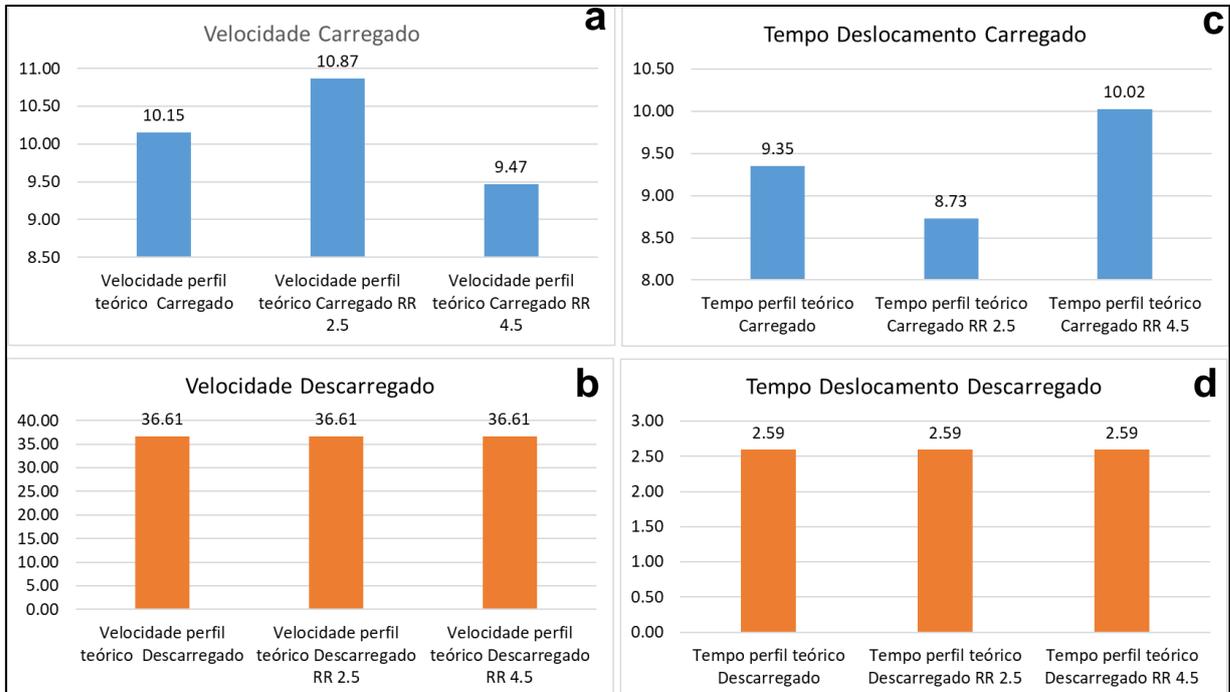


Figura 46 - Comparativo de Velocidade Carregado (a) Descarregado (b) e tempo de deslocamento do caminhão na estrada Carregado (c) Descarregado (d) para a estrada do Britador

A Figura 47(a) mostra claramente o aumento de velocidade para caminhão carregado em todos os pontos da estrada quando ações de melhoria na resistência ao rolamento do acesso são realizadas. Em contrapartida, a velocidade decresce quando um plano de manutenção nessas vias não é aplicado, fazendo com que em todos os pontos haja uma redução em velocidade, para caminhão carregado. Para o perfil descarregado, a mudança na resistência ao rolamento não acarretou mudanças na velocidade que o caminhão conseguiria desenvolver na via.

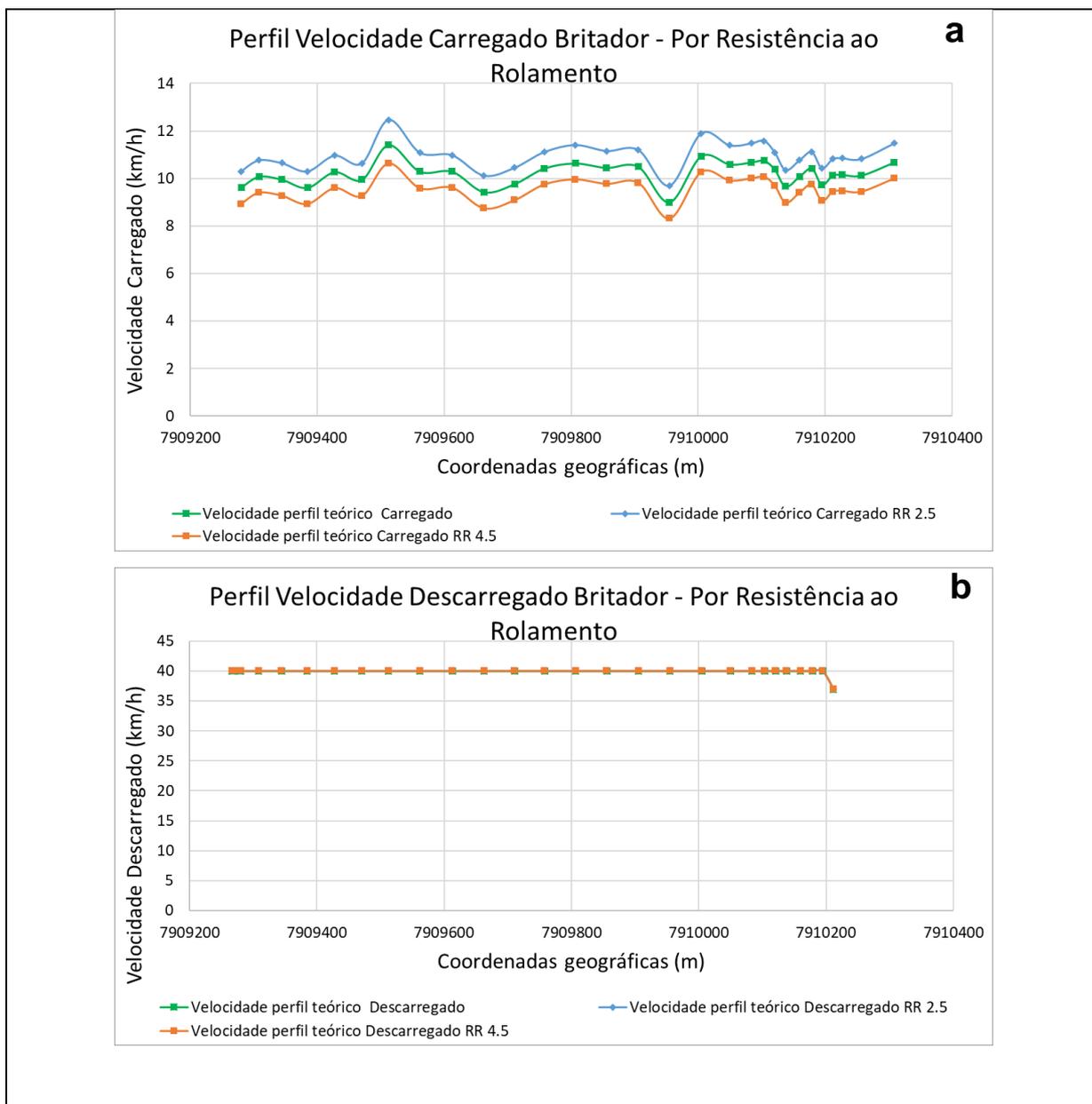


Figura 47 - Perfil de velocidade para variação de resistência ao rolamento da estrada da Fase 4 Carregado (a) Descarregado (b)

4.5.2 Análise da Variação na declividade

O resultado para as simulações de redução de declividade para um determinado trecho da estrada (Figura 48) da Fase 4, de 9,5% para 9%, demonstrou um ganho na velocidade média. A velocidade para caminhão carregado passaria de 26,93 km/h para 27,85 km/h, uma variação de aproximadamente 3,28%. Comparando a velocidade descarregado, esse ganho passa a ser de 5,23%. Quando extrapolada a redução da declividade para 8%, a velocidade do caminhão para 28,09km/h e 30,53 km/h quando descarregado.

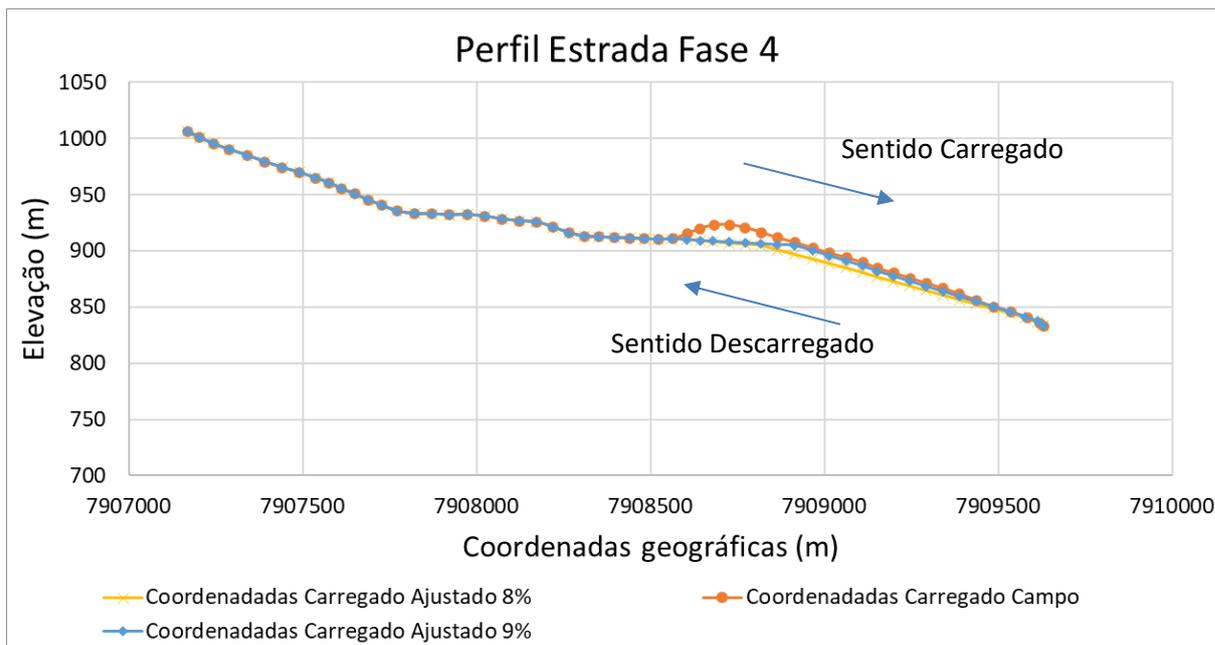


Figura 48 - Perfil da estrada da Fase 4 para diferentes inclinações

A alteração no perfil da estrada destacado na Figura 49 e na Figura 50, foi necessária para simular o impacto de uma alteração maior na geometria do trecho destacado. O caminhão precisa subir, e logo em seguida, descer em curta distância. Para uniformizar esse trecho e realizar concordância com o restante da estrada, pequenas alterações para correção desse trecho não eram mais possíveis. Nesse caso foi simulada a correção dessa geometria de forma a nivelar ao máximo possível, concordando com o restante da estrada. Essa mudança no perfil resultou na necessidade de realizar a recorrência dos taludes existentes, visto na Figura 51 e Figura 52.

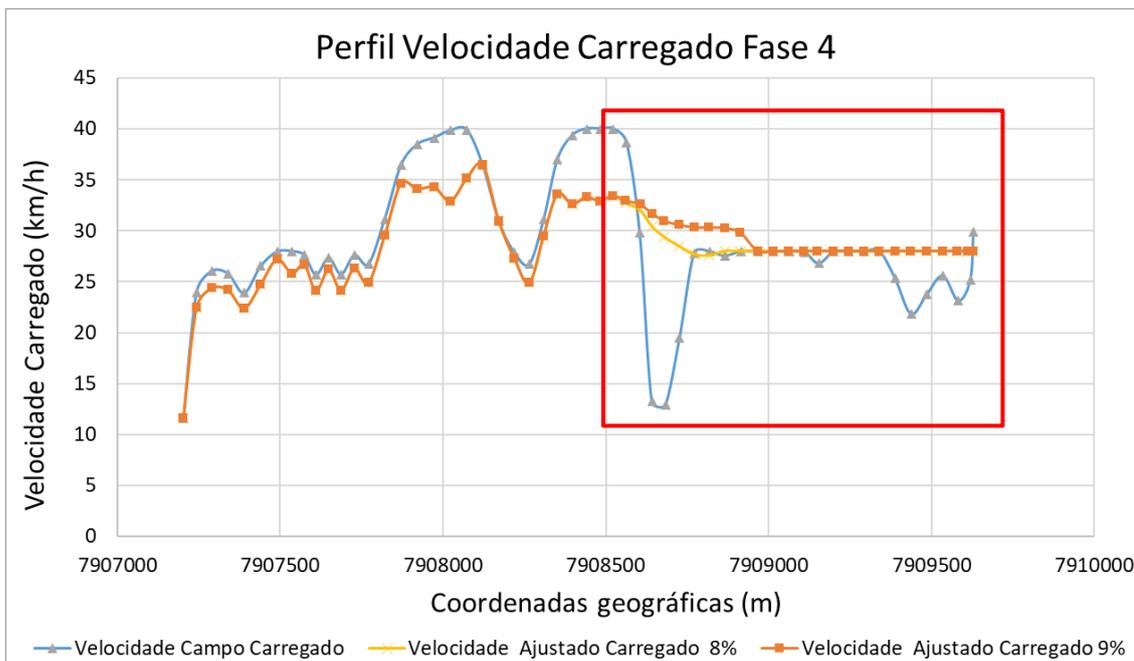


Figura 49 - Comparativo de velocidade carregado para declividade atual de trecho da estrada da Fase 4 e ajuste de declividade para 9% e 8%

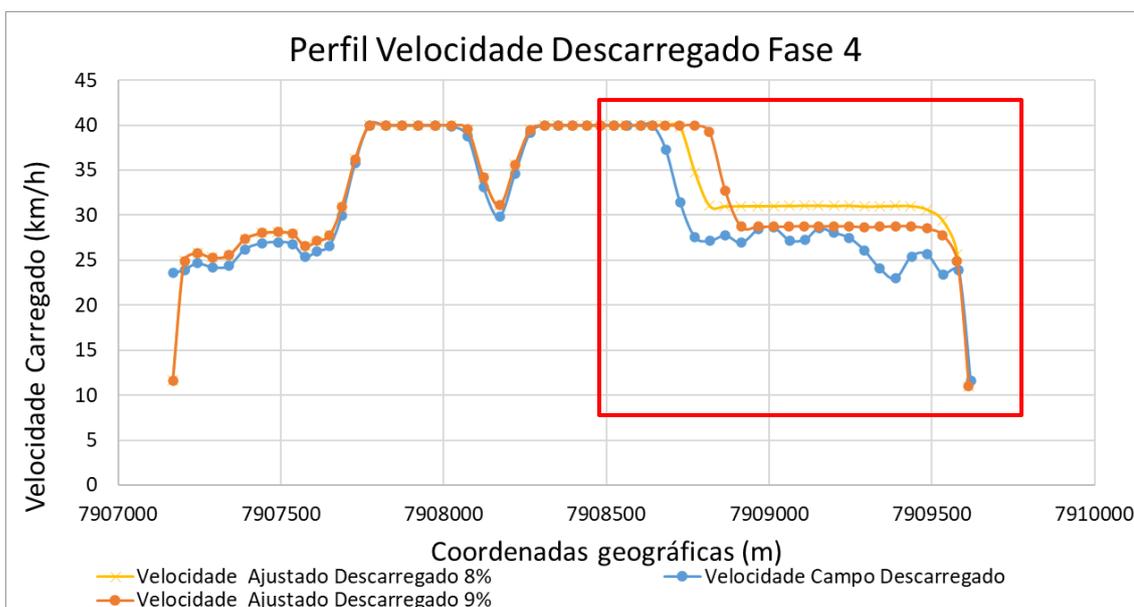


Figura 50 - Comparativo de velocidade descarregado para declividade atual de trecho da estrada da Fase 4 e ajuste de declividade para 9% e 8%

Para atingir as adequações de declividade propostas no trabalho, será necessário realizar a recorrência nos taludes existentes para ambas simulações (Figura 51(a)). Para a atingir a declividade de 9%, será movimentado um volume de aproximadamente 360,000 m³, conforme Figura 52(a). Para adequação da declividade a 8%, será realizada uma movimentação de 665,000 m³, conforme Figura 52(b). Na Tabela 11 é possível observar a relação entre o ganho de

velocidade com a redução na inclinação e correção da estrada contra a movimentação necessária para adequá-la.

Tabela 11 - Comparativo de velocidade para diferentes inclinações e movimentação necessária para adequar o acesso

	Velocidade Carregado (km/h)	Velocidade Descarregado (km/h)	Movimentação ('x000m³)
Declividade 9.5%	26,93	29,32	
Declividade 9%	27,85	30,94	360
Declividade 8%	28,09	30,53	665

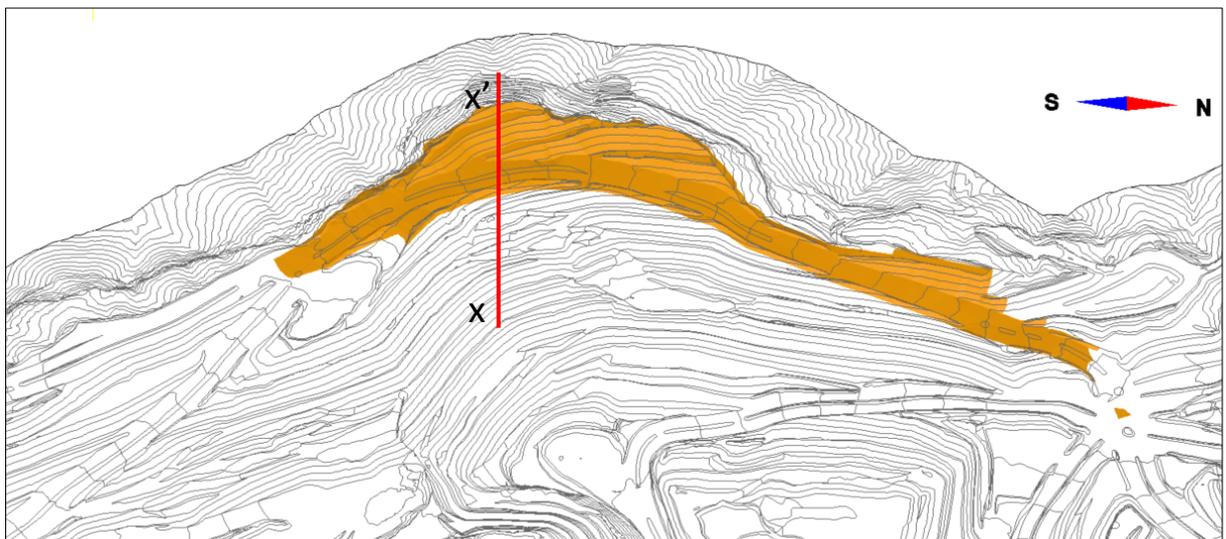


Figura 51 - Trecho estudado para recorrência de talude e adequação da inclinação da estrada da Fase 4

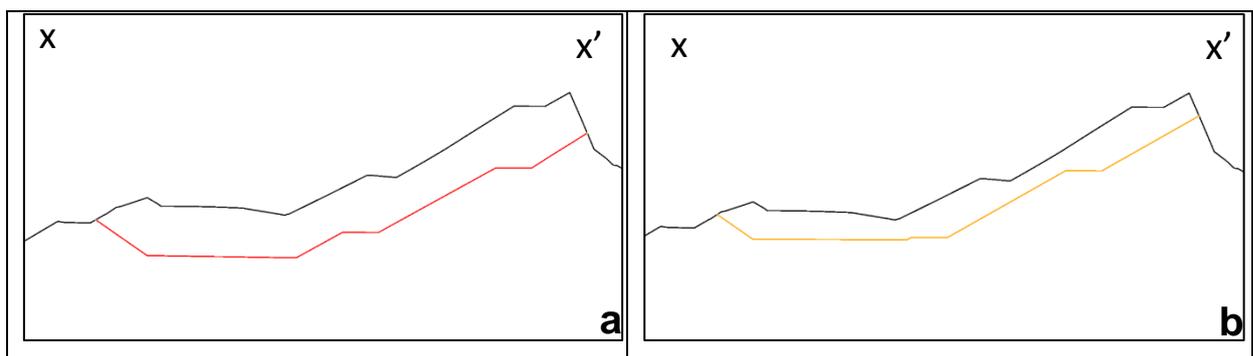


Figura 52 - Seção da topografia existente e proposta de adequação do trecho para declividade de 8% (a) e 9% (b)

4.6 RESULTADO DA COLETA E COMPARATIVO DO USO DOS REGISTROS DE PRESSÃO DA SUSPENSÃO DOS CAMINHÕES PARA DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS NAS ESTRADAS

Os resultados obtidos dos levantamentos em tempo real podem ser visualizados nas Figuras 58 a 61. Eles demonstram a variação da pressão da suspensão à medida que os caminhões, carregado ou descarregado, trafegavam pelas estradas em estudo.

A pressão na suspensão está identificada nos gráficos conforme legenda:

- LF – Pressão suspensão esquerda dianteira (*Left Front*)
- LR - Pressão suspensão esquerda traseira (*Left Rear*)
- RF - Pressão suspensão direita dianteira (*Right Front*)
- RR - Pressão suspensão direita traseira (*Right Rear*)
- Defeitos observados em campo

Na tentativa de identificar deformações na pista através da variação na suspensão, observa-se que o caminhão, quando descarregado, não apresentou grandes variações na pressão que pudessem correlacionar de forma rápida com os defeitos registrados no campo. Na Figura 53, observa-se uma ligeira variação da suspensão do caminhão quando passados pelos defeitos de número 12 e 13, que eram as maiores deformações na pista sentido descarregado observados em campo. Essas mesmas observações foram identificadas nos demais caminhões que podem ser vistos nas Figura 57 e Figura 58 em Anexo A.

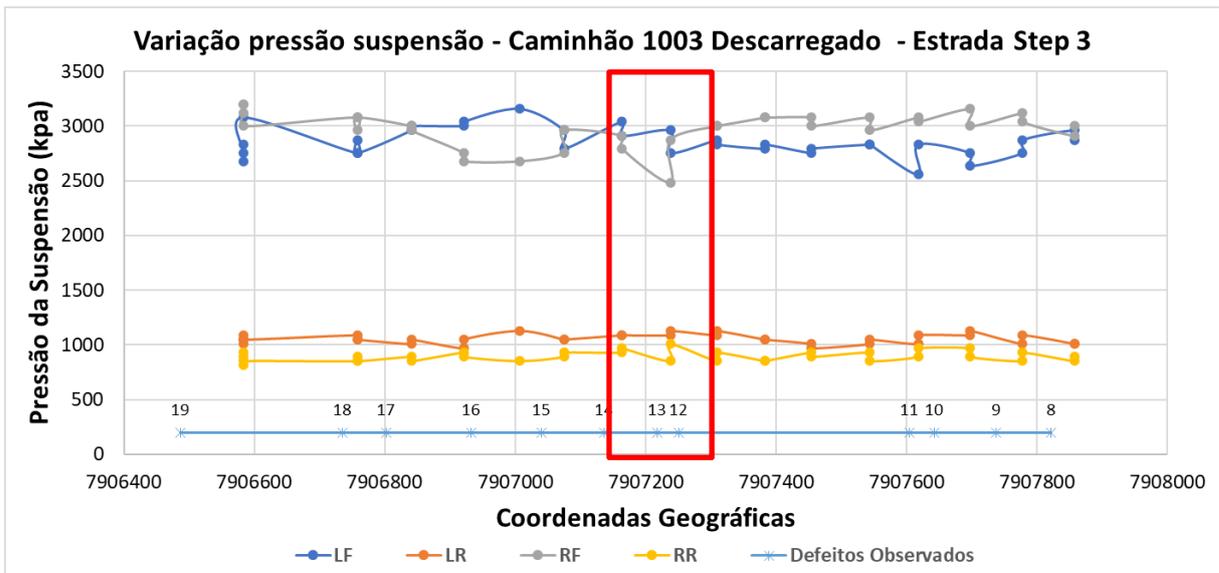


Figura 53 - Variação da pressão da suspensão ao longo da estrada Step 3 – Caminhão 1003 Descarregado

Na estrada da fase 4, visto na Figura 54, o mesmo comportamento visto na estrada do Step 3 é observado nos defeitos de número 48 e 49, ambos foram percebidos em uma ligeira variação da suspensão dianteira e traseira do caminhão. Demais observações apresentaram comportamentos equivalentes para os outros caminhões e podem ser vistas nas Figura 59 e Figura 60 no Anexo A.

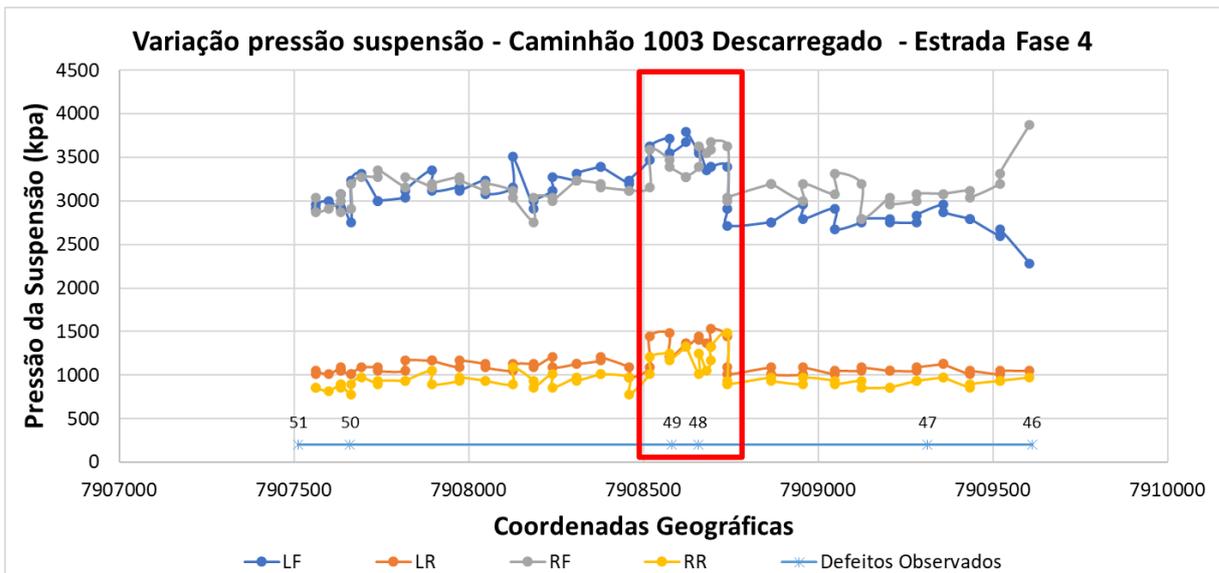


Figura 54 - Variação da pressão da suspensão ao longo da estrada Fase 4 – Caminhão 1003 Descarregado

Quando analisados os registros coletados no sistema para os caminhões carregados (Figura 55), observa-se apenas dois defeitos, o de número 24 e 30, foram melhor representados pelas variações na pressão da suspensão, tanto da dianteira e

traseira do caminhão. Essas duas deformações em campo já são conhecidas e que apresentam maiores extensão e profundidade, confirmando o comportamento observado nos gráficos de pressão na suspensão. A diminuição gradual da pressão da suspensão pode ser mais bem visualizada nas suspensões dianteiras, mostrando a mudança na inclinação da estrada que o caminhão estava trafegando. O mesmo comportamento foi observado nos demais caminhões, Figura 61 e Figura 62 apresentado no Anexo A.

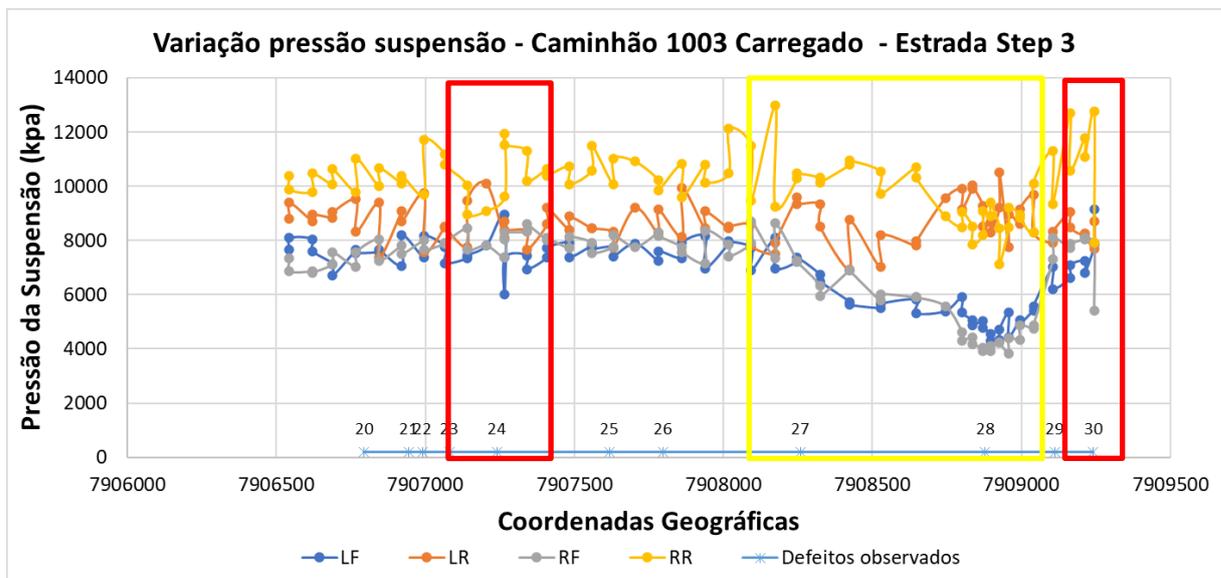


Figura 55 - Variação da pressão da suspensão ao longo da estrada Step 3 – Caminhão 1003 Carregado

Finalmente, na estrada da Fase 4, Figura 56, essa apresentou variações em toda sua extensão. Um grande número dessas variações coincidiu com os defeitos observados em campo, como demonstrado nos defeitos de número 53, 56 a 58 e 62 a 66. Ainda que essas variações de pressão correspondessem com os dados coletados em campo, nota-se que foram registrados pelo sistema outros picos que não estão necessariamente relacionados com as deformações mapeadas em campo.

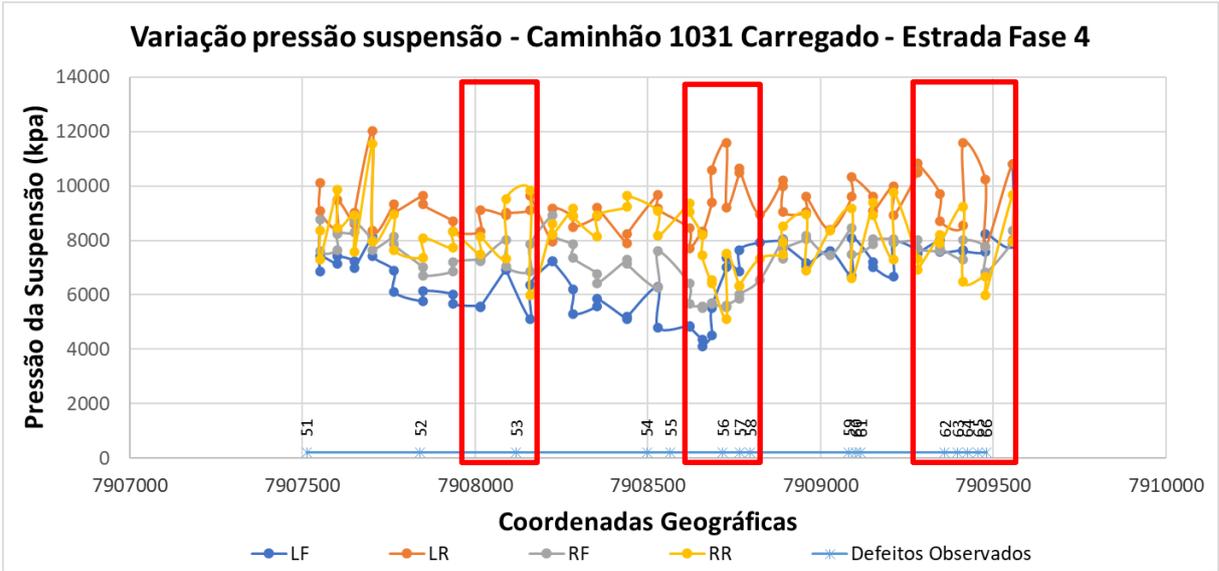


Figura 56 - Variação da pressão da suspensão ao longo da estrada Fase 4 – Caminhão 1031 Carregado

Capítulo 5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados apresentados na seção de validação da resistência ao rolamento da mina mostram a importância é a manutenção e conservação das vias para garantir a suavidade no tráfego dos caminhões e conseqüentemente o desempenho operacional. As deformações e trilhas de roda nas estradas, que esteve presente em maior número no levantamento dos defeitos, elevaram consideravelmente o resultado final da resistência que a estrada oferece ao caminhão. A frequência de defeitos dessa natureza, como causa da elevação da resistência ao rolamento, sugere a necessidade da revisão dos projetos estruturais das estradas para que os defeitos sejam corrigidos de forma definitiva. As simulações realizadas com a variação da resistência ao rolamento mostraram numericamente os impactos nos tempos de ciclo e velocidade. A implementação de uma rotina de inspeção com controle semanal para quantificação do índice de defeitos e determinação da resistência ao rolamento pode fornecer à equipe de infraestrutura de mina condições para melhorar a estratégia de alocação de recursos para manutenção de estradas conforme o grau de severidade encontrado.

Quando observados os valores das velocidades teóricas calculadas, essa métrica demonstrou ser válida para identificação de defeitos das estradas. Conforme visto nas simulações de defeitos a partir da variação da velocidade no perfil de transporte, esses estão, em sua maioria, relacionados a inadequações dos projetos geométricos definidos para essas estradas. A constante variação nas inclinações longitudinais das vias, decorrentes da não observância ao projeto geométrico inicial na sua fase de construção ou mesmo por manutenções realizadas sem um fluxo de conferência, mostram que elas podem ocasionar reduções de até aproximadamente 8% na velocidade em determinados trechos da estrada.

Durante o comparativo da velocidade teórica das vias e os registros de velocidade dos caminhões foi demonstrada uma boa relação das variáveis utilizadas para

compor a velocidade teórica em cada estrada estudada. No entanto, ainda que exista uma boa aderência entre a curva teórica e os registros, obstruções não identificadas na inspeção visual, ou até mesmo restrições impostas pelo sistema de controle de velocidade gerando receio dos operadores em trabalhar em velocidades próximas ao limite de segurança se apresentam como possíveis causas de não atingimento da velocidade simulada. Para a equipe de planejamento de lavra, essas variáveis passam a ser importantes durante a fase de dimensionamento dos caminhões e suas frotas.

As correções geométricas propostas, ainda que em modestas, considerando mínima movimentação de material, demonstraram ser suficientes em determinados trechos das estradas, proporcionando melhorias de até 8% nas velocidades e, conseqüentemente, melhorando o tempo de ciclo de transporte dos caminhões. Quando analisada uma variação de declividade de uma das estradas da mina, observou-se que a redução da declividade de 9,5% para 9% e posteriormente para 8% resultaram em ganhos significativos de velocidade ainda que fosse necessário realizar uma movimentação de material para adequação da geometria.

O comparativo do uso dos registros de pressão das suspensões dos caminhões para diagnósticos de defeitos nas estradas consistiu em mais uma oportunidade da equipe de planejamento e infraestrutura de mina para identificação de deformações nas pistas. Apesar de ser um indicador relevante, não foi capaz de identificar todas deformações cadastradas na fase de coleta de campo. Sendo assim, a pressão da suspensão pode ser utilizada como uma análise inicial, junto à equipe de telemetria e despacho para alertar o time de campo quanto às possíveis deformações nas estradas.

Como sugestão para desenvolvimentos futuros relacionados a identificação de defeitos em estradas de mineração, propõe-se:

- Realizar o dimensionamento e calcular o projeto estrutural das estradas da mina considerando o caráter de permanência delas. Durante o desenvolvimento desse trabalho, verificou-se que não conformidades com

carga nesses acessos poderiam estar influenciando no surgimento acelerado de deformações nas pistas.

- Aplicar rotineiramente a tabela de avaliação de estradas para proporcionar, de forma rápida a identificação de defeitos que devem ser tratados. Uma vez que sua utilização é de fácil entendimento e os ganhos para melhoria da gestão de manutenção das estradas são positivas.
- Incluir outras estradas nas análises de redução da declividade ou de readequação do projeto de forma a reduzir os tempos de transporte na mina. Essas análises deverão ser realizadas juntamente com o cálculo necessário de movimentação para obter esses ganhos e inclusão nos planos de lavra.
- Aplicação de sistema de monitoramento de estradas em tempo real utilizando outros parâmetros operacionais que possuem forte correlação com os defeitos de estrada.
- Utilização de sistemas de alta precisão nas motoniveladoras de forma que esses equipamentos sigam o projeto geométrico para cada via que está sendo trabalhada, evitando assim que ao passar do tempo se perca as características originais do projeto.

REFERÊNCIAS

AUSTRALIA. Coal Mining Safety and Health Regulation 2017. Disponível em <<https://www.legislation.qld.gov.au/view/pdf/asmade/sl-2017-0165>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

AUSTRALIA GOVERNMENT. Department of Resources, Energy and Tourism, Australia. Analyses of Diesel for Mine Haul and Transport Operations, A Case Study. 2010. Disponível em <<http://eex.gov.au/files/2014/06/Analyses-of-Diesel-Use-for-Mine-Haul-and-Transport-Operations.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2018

BEZERRA, R. S. N. Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS). 2004. 189 f. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. Normas Regulamentadoras de Segurança e Medicina do Trabalho. NR 22: Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. 2016. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images//Documentos/SST/NR/NR-22-atualizada-2016.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

CATERPILLAR. Caterpillar Performance Handbook. 46 ed. Illinois: Caterpillar Inc., janeiro 2016.

CHAMANARA, A. Enhancing mine haul truck KPIs via payload balance. 2013, 165 f. Tese (Doctor of Philosophy in Mining Engineering). Department of Civil and Environmental Engineering. Edmonton, Alberta

COLLINS, J.L.; FYTAS, K.; SINGHAL, R.K. Design, construction and maintenance of surface mine haulage roads. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, p.137-145, 1987.

DOTTO, M.S. Impact of hauler scale in mine planning. 2014. 92 f. Tese (Mestrado) - University of Alberta. Edmonton, Alberta.

ELAM, R.A.; TEASTER JR, E.C.; LAWLESS, M.J. Haul Road Inspection Handbook. US Department of Labor: MSHA Handbook Series, Handbook Number PH99-I-4, 1999.

FILHO, W.D.C. Proposta de tecnologias construtivas de sistema viário aplicado a minerações de ferro. 2010. 185 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

HOLMAN, P. Caterpillar® Haul Road Design and Management. 2006. 106 p. Apresentação. Disponível em <<http://www.directminingservices.com/wp-content/uploads/2010/06/CAT-Haul-Road-Design.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

HUGO D. Haul road defect identification and condition assessment using measured truck response. 2005. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria, South Africa.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. Open Pit Mine Planning & Design: Volume 1 – Fundamentals, 3rd ed. London: Taylor and Francis Group, 2013.

JUNIOR, W.S.F. Análise do desempenho dos operadores de equipamentos de mina e simulação de cenários futuros de lavra – Estudo de caso (Mina Casa de Pedra – Congonhas / Mg). 2014, 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mina). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais.

KAUFMAN, W.W.; AULT, J.C. Design of Surface Mine Haulage Roads - A Manual., Pensilvania: Pittsburgh Research Laboratory Library, 50 p. 1977.

KARAFIATH, L.L. Rolling resistance of off-road vehicles. J. Const. Eng. and Management, ASCE, p. 458-471, 1988.

KOMATSU. Specification and application handbook. 31 ed. Japão: Komatsu, Abril 2013

KUMAR, V. Design and construction of haul roads using fly ash. 2000. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – University of Alberta, Alberta.

MODULAR. Aplicativo Monitoramento em Tempo Real – Sistema MineCare® 2.2. Revisão A. 2011a

MODULAR. Aplicativo de Análise de Tendências – Sistema MineCare® 2.2. Revisão A. 2011b

MODULAR. MineCare® - Aplicações e Utilidades - Manual de Treinamento de Usuários. Modular Mining Systems, 2012a.

MODULAR. Guia para criação de modelos de tendências MineCare®. Modular Mining Systems, 2012b.

MOHUTSIWA, M; MUSINGWINI, C. Parametric estimation of capital costs for establishing a coal mine: SouthAfrica case study. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Journal. South Africa, vol. 115, p. 789-797, ago. 2015.

NGWANGWA, H.M.; HEYNS, P.S. Application of an ANN-based methodology for road surface condition identification on mining vehicles and roads, Journal of Terramechanics, v. 53 p. 59-74, apr. 2014.

NGWANGWA, H.M.; HEYNS, P.S; LABUSCHAGNE, F.J.J.; KULULANGA, G.K. Reconstruction of road defects and road roughness classification using vertical

vehicle accelerations with artificial neural networks simulation. *Journal of Terramechanics*, v.47, p. 97–111, aug. 2010.

PARK, S.; POPOV, A.A.; COLE, D.J. Influence of soil deformation on off-road heavy vehicle suspension vibration. *Journal of Terramechanics*, v.41, p.41-68, 2004.

PELLISSARI, F.P. Projeto de Estrada para Mineração – Caracterização e Análise de Aplicação. 2019, 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mina). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

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

REIS, M.S. Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra à céu aberto de minério de ferro dentro do Quadrilátero Ferrífero. 2014. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.

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

SOUSA, L. M. L. S. Estudos de dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto. 2011. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

TANNANT, D.D.; REGENSBURG, B. Guidelines for mine haul road design, 2001. 111 p.

TEIXEIRA, L.A. Caracterização de *Payload* via Telemetria. 2016, 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mina). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

THOMPSON, R.J. Haul Road Design Considerations Recognizing, managing and eliminating safety critical defects on mine haul roads. *Engineering & Mining Journal*. South Africa. p. 36-43, jun. 2009.

THOMPSON, R.J. Building Better Haul Roads - Higher payloads and autonomous operations need roads designed for structural strength. *Engineering & Mining Journal*. South Africa. p.48-53, jun. 2011.

THOMPSON, R. J. Using Big Data to Predict Haul Road Performance. *Engineering and Mining Journal*, Jacksonville, vol. 219, p. 34-37, mar. 2018.

THOMPSON, R.J.; FOURIE, G.A.; VISSER, A.T.; SMITH, R.A.F. Benchmarking haulroad design standards to reduce transportation accidents, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, p. 157-162, 1998.

THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. Towards a mechanistic structural design method for surface mine haul roads. *Journal of the South African institution of civil engineers*. South Africa, vol. 38 num. 2, p. 13-21, Segundo trimestre 1996.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. Designing and managing unpaved opencast mine haul roads for optimum performance, *SME Annual Meeting*. Denver, Colorado, p. 1-9, 1999.

THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. The functional design of surface mine haul roads. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, p.169-180, jun. 2000.

THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. Mine haul road maintenance management systems. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 103, num. 5, p. 303–312, jun. 2003.

THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. Selection and maintenance of mine haul road wearing course materials. *Mining Technology: IMM Transactions section A*, vol.115 num. 4, p. 123-128, dez. 2006a.

THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. The impact of rolling resistance on fuel, speed and costs. *HME 2006: Continuous improvement case studies*, 16 p., 2006b.

THOMPSON, R.J; VISSER, A.T; MILLER, R.E e LOWE, T. The development of real-time mine road maintenance management system using haul truck and road vibration signature analysis. *Transportation Research Record*, Washington DC, vol.1, no.1819, p. 305-312, 2003.

VIEIRA, J.C. Determinação e quantificação de elementos de relevância em infraestrutura de mina. 2013, 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mina). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Parauapebas.

VISSER, A.T. Mine haul road design, construction and maintenance management: Short course offered in Mining Engineering of the Federal University of Rio Grande do Sul. 2013.

VISSER, A.T. Haul roads can make money! *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Journal*. South Africa, vol. 115, p. 993-999, nov. 2015.

ANEXO A – VARIAÇÃO DE PRESSÃO NA SUSPENSÃO DOS CAMINHÕES

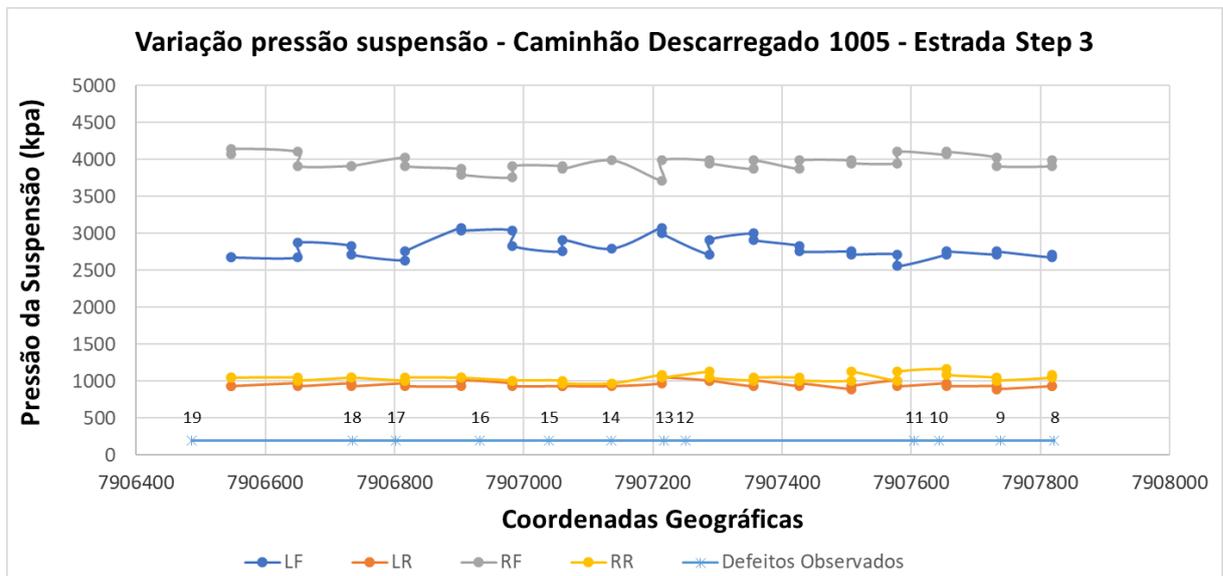


Figura 57 - Variação da pressão da suspensão na estrada Step 3 – Caminhão 1005 Descarregado

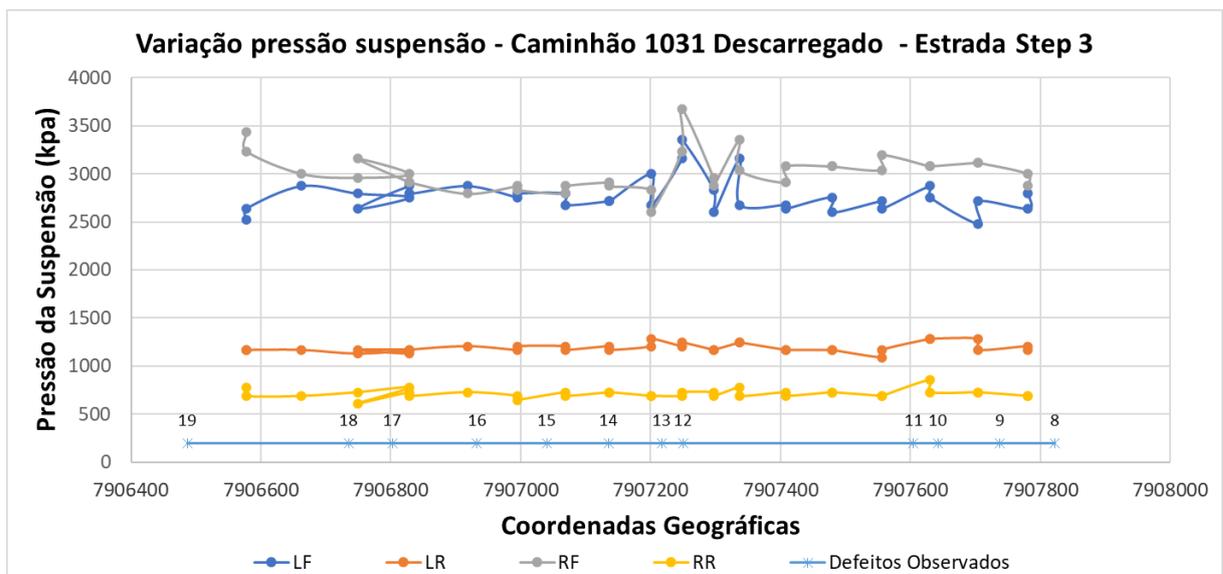


Figura 58 - Variação da pressão da suspensão na estrada Step 3 – Caminhão 1031 Descarregado

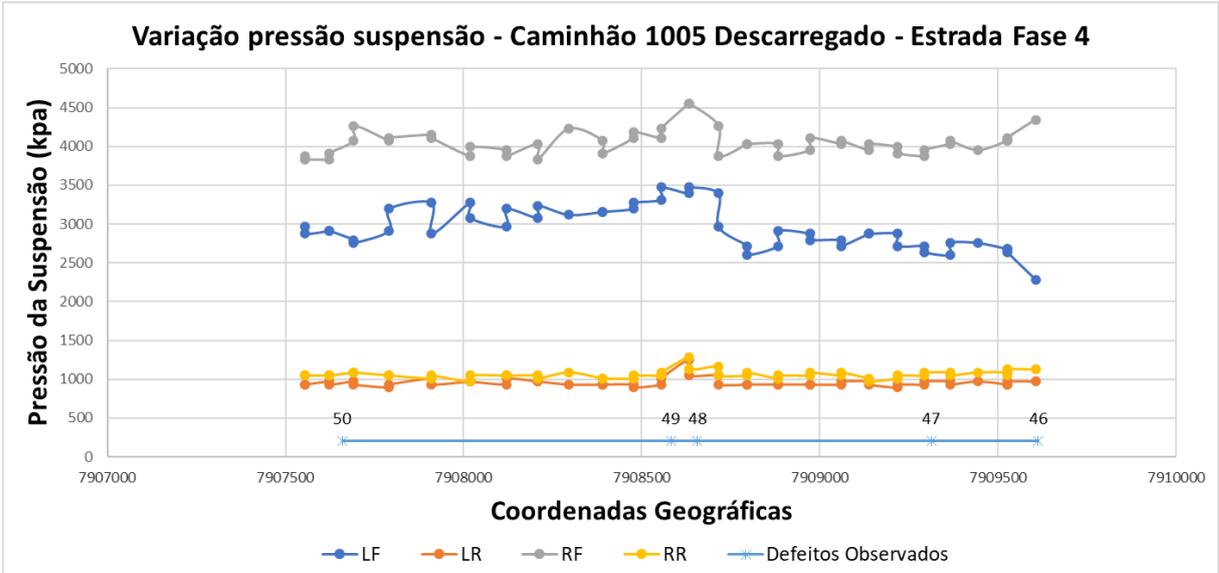


Figura 59 - Variação da pressão da suspensão na estrada Fase 4 – Caminhão 1005 Descarregado

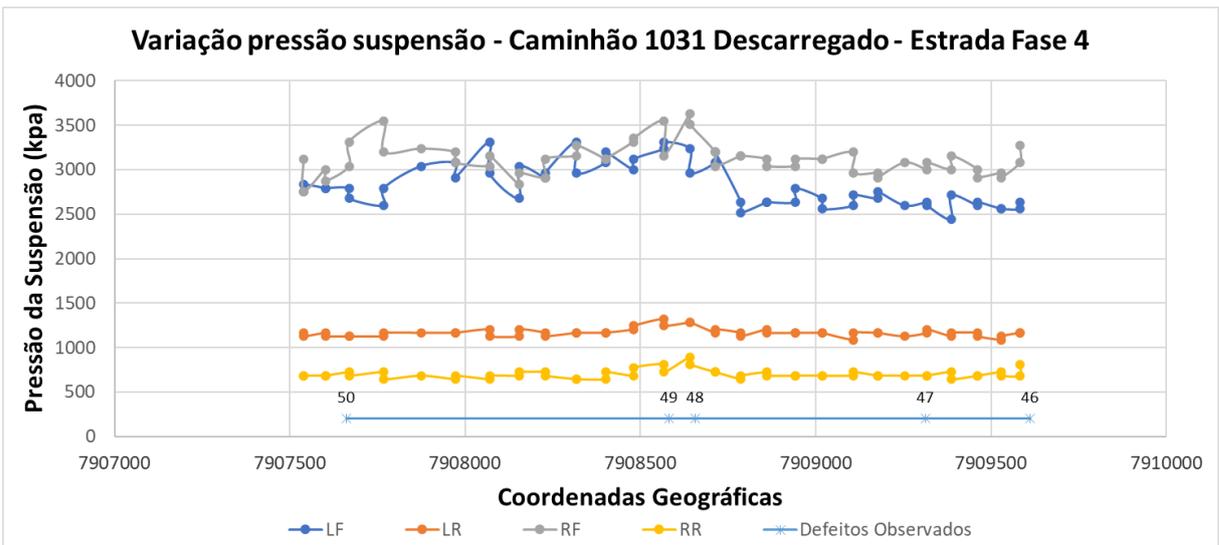


Figura 60 - Variação da pressão da suspensão na estrada Fase 4 – Caminhão 1031 Descarregado

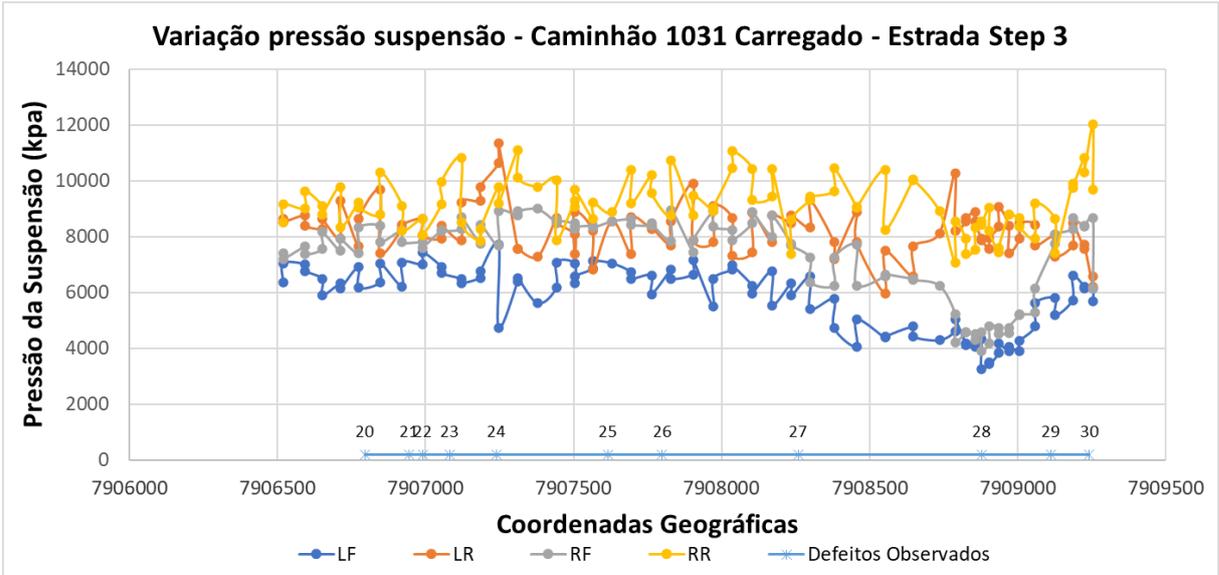


Figura 61 - Variação da pressão da suspensão na estrada Step 3 – Caminhão 1031 Carregado

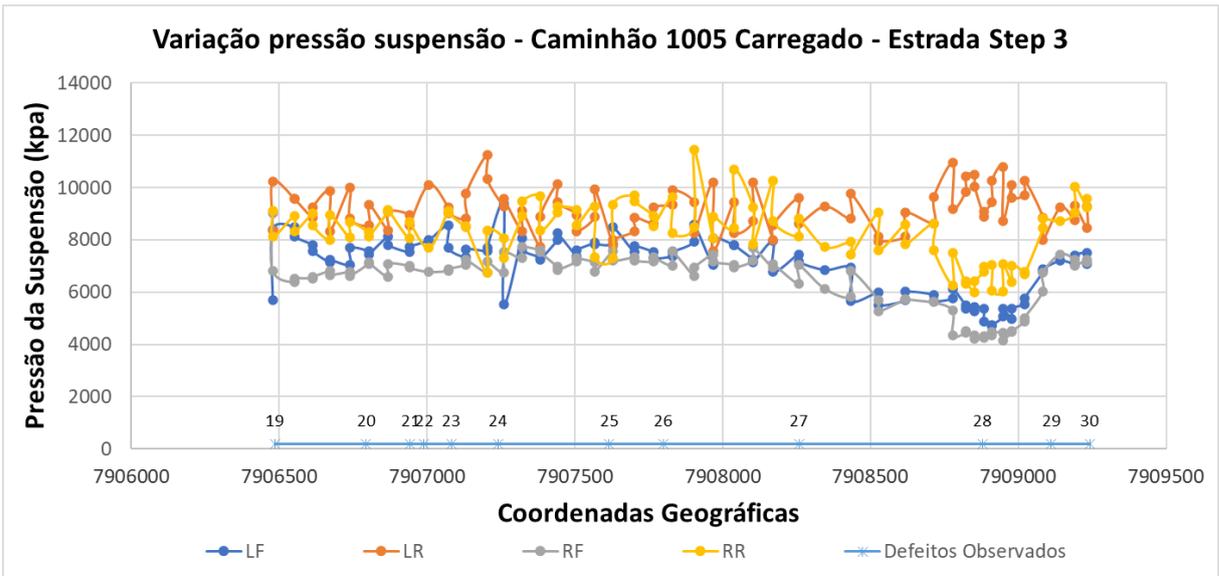


Figura 62 - Variação da pressão da suspensão na estrada Step 3 – Caminhão 1005 Carregado