



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral



NAYARA RILLA DE SOUZA MACHADO

**MONITORAMENTO DE ESTRADAS DE UMA MINA EM MINAS
GERAIS ATRAVÉS DA FERRAMENTA RAC (*Road Analysis
Control*)**

Área de concentração: Engenharia Mineral

Linha de pesquisa: Lavra de minas

Proposta de dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Orientador: **Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz**
Coorientador: **Prof. Dr. Vladmir Kronemberger Alves**

**OURO PRETO
2022**

NAYARA RILLA DE SOUZA MACHADO

**MONITORAMENTO DE ESTRADAS DE UMA MINA EM MINAS
GERAIS ATRAVÉS DA FERRAMENTA RAC (*Road Analysis
Control*)**

Área de concentração: Engenharia Mineral

Linha de Pesquisa: Lavra de Minas

Proposta de dissertação apresentada ao curso de Pós Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Orientador: **Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz**
Coorientador: **Prof. Dr. Vladmir Kronemberger Alves**

**OURO PRETO
2022**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M149m Machado, Nayara Rilla de Souza.

Monitoramento de estradas de uma mina em Minas Gerais através da ferramenta RAC (Road Analysis Control). [manuscrito] / Nayara Rilla de Souza Machado. - 2022.

128 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros Luz.

Coorientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Engenharia Mineral.

1. Lavra de minas. 2. Minas e recursos minerais - Carregamento e transporte. 3. Redução de custos - Minas e mineração. I. Alves, Vladimir Kronemberger. II. Luz, José Aurélio Medeiros. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.68

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nayara Rilla de Souza Machado

Monitoramento de estradas de uma mina em minas gerais através da ferramenta RAC (*Road Analysis Control*)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Aprovada em 16 de dezembro de 2022

Membros da banca

[Doutor] - Vladimir Kronemberger Alves - Coorientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutor] - Hernani Mota de Lima- (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutor] - Jose Ildefonso Gusmão Dutra - (Universidade Federal de Minas Gerais)

Vladimir Kronemberger Alves, coorientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 23/01/2023



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/01/2023, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0460241** e o código CRC **A3D47E1B**.

A Deus,
pelo dom da vida, e
à minha família, base de tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que esse trabalho fosse possível. Muito obrigada a Deus pela sabedoria e a todas as pessoas que me apoiaram nessa grande jornada.

Agradeço à minha família por todo acompanhamento e apoio durante minha trajetória pessoal, educacional e profissional. Em especial aos meus pais Guaracy e Délcio, por serem tão amorosos e pacientes em todas as etapas da minha vida. Aos meus avós Nena e Zuza, por me encorajarem a sempre entregar o melhor para mim.

Ao meu marido Moysés por todo companheirismo, amor, amizade e confiança. Agradeço a ele por estar ao meu lado em todos os momentos desafiadores e não deixar que eu desistisse em nenhum momento. Agradeço aos meus sogros Denize e Eduardo, pelo carinho e à minha cunhada Ana Luiza que, mesmo estando nos EUA, me deu todo apoio para que eu continuasse a caminhada.

Aos meus amigos por estarem sempre por perto, me dando apoio e sendo compreensivos com minhas ausências, em especial Matilde, Bárbara, Evelyn e Ludmila, que me apoiaram muito durante esse tempo.

A equipe da Vale / MCA por todo apoio e compreensão durante a reta final desse trabalho. Agradeço pela energia e contribuição.

Agradeço à gloriosa Escola de Minas de Ouro Preto pela minha formação como Engenheira de Minas, o que me fez prosseguir e ter como objetivo novos desafios. A gloriosa me abriu portas incríveis, às quais não seria capaz de descrever em palavras.

Muito obrigada aos mestres que estiveram presentes e me apoiaram nesse caminho, em especial ao professor Hernani Mota de Lima pela confiança no meu trabalho e na minha capacidade. Ao professor José Fernando Miranda pelo apoio e amizade de sempre. Ao meu orientador José Aurélio Medeiros da Luz e ao meu coorientador Vladimir Kronemberger Alves. Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Minas, meu muito obrigada!

*“Run, rabbit, run
Dig that hole, forget the sun
When, at last, the work is done
Don't sit down, it's time to dig another one”*

“Breathe”, Pink Floyd

RESUMO

A mineração é uma atividade econômica importante e necessária em muitos países do mundo. Essa atividade contribui muito para a concentração de renda nacional, geração de empregos e tecnologia. Para atender às grandes demandas de produção da indústria, as capacidades dos caminhões aumentaram significativamente, impactando as condições operacionais das estradas de mina, uma vez que foram construídas quando o porte de equipamentos era menor. As condições da superfície de uma estrada de acesso influenciam diretamente parâmetros de segurança, qualidade e custos de manutenção dos caminhões. Surge assim a ferramenta RAC (*Road Analysis Control*) que trata-se de um produto de informação que permite ao supervisor monitorar as condições das estradas de transporte e otimizar o desempenho, a produtividade e a segurança dos caminhões da mineração de grande porte. Essa tecnologia contribui para reduzir os custos de reparo e manutenção. O RAC fornece *feedback* ao operador sobre condições das vias prejudiciais aos componentes do ativo, dando ao colaborador o poder de atuação no processo. Nesse trabalho, o principal objetivo é demonstrar o quanto essa ferramenta (RAC) contribui para o empreendimento mineiro para redução de custos, apontando uma economia de R\$8,85 mil reais através do monitoramento em tempo real, analisando valores de jan/22 a abr/22.

Palavras-chave: Mineração; RAC (*Road Analysis Control*); Transporte; Redução de custos.

ABSTRACT

Mining is an important and necessary economic activity in many countries of the world. This activity contributes a lot to the concentration of national income, job creation and technology. To meet the large production demands of the industry, truck capacities have increased significantly, impacting the operational conditions of mine roads, since they were built when the equipment size was smaller. The surface conditions of an access road directly influence parameters of safety, quality and maintenance costs of trucks. This is how the RAC (Road Analysis Control) tool is born. It is an information product that allows the supervisor to monitor the conditions of haul roads and optimize the performance, productivity and safety of large mining trucks. This technology contributes to reducing repair and maintenance costs. RAC provides feedback to the operator on road conditions harmful to asset components, giving the employee the power to act in the process. In this work, the main objective is to demonstrate how much this tool (RAC) contributes to the mining enterprise to reduce costs, pointing to a savings of R\$8.85 thousand through real-time monitoring, analyzing values from Jan/22 to Apr. /22.

Keywords: Mining; RAC (Road Analysis Control); Transport; Cost reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma para o projeto de vias	24
Figura 2: Esquema exemplificando a distância de parada de um veículo.	26
Figura 3: Superelevação em uma pista.....	29
Figura 4: Superlargura em estradas de mina.....	31
Figura 5: Condições de distância de visibilidade vertical e horizontal de um condutor em uma curva.....	32
Figura 6: Condições de distância de visibilidade vertical em estradas.	33
Figura 7: Condição de distância de visibilidade horizontal.	34
Figura 8: Esquema de elementos de transição.	36
Figura 9: Exemplo da inclinação de uma via e espessuras analisadas.....	37
Figura 10: Inclinação longitudinal constante e inconstante.	38
Figura 11: Inclinação transversal com caimento lateral único.	39
Figura 12: Inclinação transversal com abaulamento central.	39
Figura 13: Valetas construídas para drenagem.	41
Figura 14: Valetas de proteção de corte e aterro.....	41
Figura 15: Sarjeta de corte.	43
Figura 16: Principais camadas de um pavimento.....	44
Figura 17: Valores e CBR em função do peso do caminhão.....	47
Figura 18: Desenho esquemático de DCP.	49
Figura 19: Ábaco que correlaciona os golpes com o CBR.	50
Figura 20: Recomendação de profundidade se acordo com CBR.	51
Figura 21: Relação qualitativa do revestimento.....	53
Figura 22: Gráfico de custo ótimo.	56
Figura 23:Desenvolvimento e integração do sistema de manutenção de estradas da mina em tempo real com os sistemas existentes de comunicação, localização e monitoramento de caminhões em toda a mina.....	57
Figura 24: Mapa de densidade de defeitos rodoviários para testes de campo na Mina Grootegeluk. Os símbolos representam a magnitude do defeito (profundidade ou altura	58
Figura 25: Equilíbrio dinâmico de uma massa não suspensa de frente independente mu do caminhão de transporte.....	60

Figura 26: O Komatsu 730E Haulpack usado no estudo.	63
Figura 27: Configuração de teste para a caracterização do amortecedor Komatsu 730E Haulpack.....	65
Figura 28: Características medidas e calculadas da rigidez do amortecedor de suspensão.	66
Figura 29: Características medidas e extrapoladas da ação do amortecedor.	68
Figura 30: Gradiente incorreto (não uniforme - vermelho) e correto (uniforme - verde).	70
Figura 31: Limitando a tensão vertical relacionada à importância e categoria da estrada.	72
Figura 32: Superfície topográfica com as estradas de transporte ativas consideradas no estudo.	77
Figura 33: Perfil de elevação detalhado da rota AB.....	77
Figura 34: Perfil de elevação detalhado da rota CD.....	78
Figura 35: Uma operação de veículo em dados de rugosidade de uma estrada no local da mina. Inicialmente, o veículo está saindo de um estacionamento de caminhões, em seguida, deslocando o material e retornando ao estacionamento de caminhões.	83
Figura 36: Conceito da interface para o painel do operador.	85
Figura 37: Fluxograma do processo de detecção de estradas e obstáculos através de imagem e nuvem de pontos.....	86
Figura 38: Sistema VIMS.....	88
Figura 39: Representação gráfica referente ao FELA.	89
Figura 40: Disposição das cargas geradoras de rack.	92
Figura 41: Exemplo de esquema de rack.....	92
Figura 42: Disposição das cargas geradoras de pitch.	93
Figura 43: Exemplo de esquema de pitch.....	94
Figura 44: Disposição das cargas geradoras de bias.....	94
Figura 45: Exemplo de esquema de bias.....	95
Figura 46: Fluxo de responsabilidades das áreas envolvidas.	97
Figura 47: Mapa de rack, pitch e bias retirado do sistema HEALTH presente no Cat® MineStar™.....	98
Figura 48: Praça da ES5501.....	100
Figura 49: Área de acessos e praça do britador.....	100
Figura 50: Região da Serra do Mascate.....	100

Figura 51: Acesso 10H, entroncamento com o acesso 10M (Trevo da 4I).	101
Figura 52: Projeto do acesso 10H, entroncamento com 4I e 10M.	102
Figura 53: Projeto do acesso 10H, entroncamento com 4I e 10M, demonstrando o cut and fill (corte e enchimento).	102
Figura 54: Projeto do acesso PCN-06/10k e acesso 13T.	103
Figura 55: Material base de acesso.	104
Figura 56: Material forro de acesso.	104
Figura 57: Material acabamento de acessos.	105
Figura 58: Abaulamento de pistas.	105
Figura 59: Cobertura de canga laterítica.	106
Figura 60: Acesso construído em depósitos de estéril com base em rocha sã.	106
Figura 61: Acesso construído em pistas no interior da mina com base em rocha sã.	107
Figura 62: Acesso construído sobre rocha máfica sã com revestimento laterítico.	107
Figura 63: Valores médios de payloads da frota de caminhões 793.	108
Figura 64: Mapa de frequência de movimentação de ativos.	109
Figura 65: Mapa de movimentação de ativos apontando locais críticos de raio de curvatura.	110
Figura 66: Gráfico que apresenta os dados FELA.	111
Figura 67: Análise da classificação de uso de carga útil e índice de severidade da mina.	112
Figura 68: Valores mensais de controle de rack e pitch.	113
Figura 69: Valores de históricos mensais.	114
Figura 70: Análise de Severidade de Aplicação (ASA) – histórico.	115
Figura 71: Quantidade de eventos por hora e número de eventos de rack.	116
Figura 72: Quantidade de eventos por hora e número de eventos de pitch.	116
Figura 73: Quantidade de eventos por hora e número de eventos de bias.	116
Figura 74: Quantidade de eventos por hora e número de eventos de RAC por ativo.	117
Figura 75: Mapa RAC comparativo de praças de carregamento e acessos da mina. ...	117
Figura 76: Mapa RAC comparativo de área de depósitos e acessos da mina.	118
Figura 77: Comparativo de mapa de calor de eventos RAC.	118
Figura 78: Ferramenta quantitativa de eventos RAC.	119
Figura 79: Ferramenta Cat Minestar que promove a identificação dos ativos na mina.	120
Figura 80: Acesso 10H adequado e conformado com itabirito fino.	121

Figura 81: Savings mensais 2021/2022.....	121
Figura 82: Principais savings abril/2022.....	122
Figura 83: Dashboard telemetria abril/2022.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores típicos de coeficientes de atrito conforme a característica do tipo de material encontrado na superfície de estradas.....	27
Tabela 2: Superelevação em função da velocidade do veículo e do raio de curvatura...	29
Tabela 3: Summary of haul road categories (Thompson and Visser, 2002).....	72
Tabela 4: Lista de variáveis utilizadas para construir o modelo de simulação e o sistema de equações que explicam o consumo de combustível nas operações de transporte.....	80

SUMÁRIO

1	Introdução.....	18
1.2	Objetivos.....	19
1.3	Atividades.....	20
1.4	Metodologia.....	20
1.5	Organização da dissertação.....	21
2	Revisão Bibliográfica.....	22
2.1	Projeto geométrico.....	25
2.1.1	Distância de parada.....	25
2.1.2	Raio de curvatura.....	26
2.1.3	Superelevação.....	27
2.1.4	Superlargura em curvas.....	30
2.1.5	Distância de visibilidade.....	31
2.1.6	Largura de pista e leiras de proteção.....	35
2.1.7	Interseções entre elementos geométricos.....	36
2.1.8	Inclinação Longitudinal.....	36
2.1.9	Inclinação e direcionamento de drenagem.....	38
2.1.10	Projeto de drenagem.....	39
2.1.11	Valetas de proteção de corte e aterro.....	40
2.1.12	Sarjetas de corte e aterro.....	42
2.2	Projeto estrutural.....	43
2.2.1	Camadas do pavimento.....	44
2.2.2	Dimensionamento das camadas.....	46
2.2.3	CBR de laboratório.....	46
2.2.4	Análise de CBR de campo por DCP.....	48
2.2.5	Método mecanístico.....	51
2.3	Projeto funcional.....	51
2.4	Manutenção de estradas.....	54
2.5	Gerenciamento de manutenção de estradas de transporte.....	58
2.5.1	Metodologia de reconstrução de estradas.....	59
2.5.2	Caracterização do veículo e medições da resposta dinâmica.....	62
2.6	Relação custo-benefício nas operações utilizando manutenção de estradas.....	69
2.7	Variação de consumo de diesel.....	74
2.7.1	Fatores relacionados ao consumo de disesel.....	75
2.7.2	Seleção das variáveis para redução do consumo de diesel.....	79

2.7.3 Otimizando as estradas de transporte de minas para reduzir o consumo de combustível dos ativos.....	81
2.8 Sistema de detecção de obstáculos baseado em imagens rgb e nuvem de pontos	84
2.9 Tecnologia aplicada nesse estudo	87
2.9.1 VIMS	87
2.9.2 Road Analysis Control (RAC)	88
3. Materiais e métodos.....	97
4. Resultados.....	108
5. Conclusões	124
Referências bibliográficas.....	126

Capítulo 1

1 Introdução

A mineração é uma atividade econômica importante e necessária em muitos países do mundo. Essa atividade contribui muito para a concentração de renda nacional e geração de empregos. Os EUA são considerados um país importante e destaque na produção de minerais, contribuindo para cerca de 78 grandes commodities minerais comerciais para os mercados globais (NMA, 2016 *apud* KANSAKE, 2019). Os EUA produziram 253,2 toneladas métricas de ouro em 2018, tornando-se o quarto maior produtor de ouro do mundo (HOLMES, 2019). O país é responsável por cerca de 5,6% das reservas globais de ouro (USGS, 2019), sendo classificado como o quarto maior produtor de cobre (5,7% da produção global de cobre) e abriga 5,8% das reservas globais de cobre. É o principal produtor de diatomita (29,3% da produção global de diatomita (USGS, 2019). Esses minerais são produzidos por métodos em mineração a céu aberto. Estima-se que 92% dos metais e 96% dos minerais industriais são extraídos em mineração a céu aberto, demonstrando assim a importância desse tipo de processo (DOE, 2019).

O sistema de extração de materiais de caminhão-escavadeira é preferido na mineração de superfície devido à sua eficiência, flexibilidade e alta produtividade (KANSAKE, B.A. & FRIMPONG S., 2018). Para atender às grandes demandas de produção da indústria, as capacidades dos caminhões aumentaram significativamente ao longo dos anos, com o conceito de que “quanto maior melhor” (BAUCOM, 2019). A segurança e produtividade para obtenção de longevidade do equipamento de minas que empregam caminhões ultra grandes dependem de estradas de transporte bem projetadas, construídas e mantidas (THOMPSON, 2015).

As estradas mineiras normalmente são projetadas e desenhadas por profissionais de planejamento de lavra e executadas por equipes de operação ou infraestrutura de mina. Essas estradas são construídas para passagem de veículos de grande porte, fora de estrada, com dimensões maiores que os que circulam em estradas convencionais (PELLISSARI, 2019).

As condições da superfície de uma estrada de acesso influenciam diretamente parâmetros de segurança, qualidade e custos de manutenção dos caminhões (consumo de combustível e lubrificante, desgaste dos pneus, entre outros). A taxa de deterioração de

uma estrada que tenha sido bem construída será menor e, conseqüentemente, a frequência de manutenção corretiva será mais baixa (VIEIRA, 2013 *apud* MONTEIRO, 2021).

Uma vez que nesta área há o transporte e circulação de veículos pesados, surgem os impactos nos custos do empreendimento, destacando a importância da realização de um planejamento efetivo e uma manutenção preventiva das estradas. Esse fator pode causar diferenças consideráveis nos gastos envolvidos no empreendimento, frisando a importância do planejamento da estrada, seu desenvolvimento e medidas relativas à manutenção preventiva (FONSECA, 2009; THOMPSON; VISSER, 2003 *apud* PELLISSARI, 2019).

Conforme Pellissari (2019), para uma prévia análise de construção de estradas de uma mina, é necessário o conhecimento prévio da geologia local, a fim de que o material adequado para a construção de acessos possa ser encontrado no entorno da mina, para assim reduzir os custos envolvidos. Devem ser considerados também os elementos de drenagem superficial e projeto construtivo das estradas, avaliando aspectos geométricos, estrutural e funcional.

Dessa forma, nas minerações à céu aberto possuem o projeto e manutenção de estradas como um processo permanente, o qual necessita investimento de tempo, mão de obra e especialmente financeiro. A eficiência do transporte realizado nas estradas de mina está diretamente ligada ao estado de conservação das vias, sendo que a falta de manutenção causa excessos de manutenção dos ativos que percorrem o circuito da mina (SOKOLIC, et al., 2010). O desgaste e os danos dos componentes do caminhão e dos pneus aumentam significativamente devido a estradas de transportes ruins. O projeto e a manutenção eficientes das estradas minimizam esses problemas e garantem operações de transporte eficientes (KANSAKE *et al.*, 2019).

O presente trabalho se justifica na medida em que há necessidade de implementação de procedimentos e técnicas para proporcionar estradas adequadas para tráfego dos ativos da mina. As estradas de mina são responsáveis por escoar toda a produção realizada no empreendimento mineiro, demonstrando assim a importância de estarem adequadas para evitarem os custos excessivos que vão de encontro ao objetivo do cliente, que é obter lucratividade com alta produção (FONSECA, 2009; THOMPSON and VISSER, 2003 *apud* PELLISSARI, 2019).

1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é demonstrar uma metodologia de projeto de estradas não pavimentadas analisando aspectos geométricos, estruturais e funcionais, necessários para obter estradas adequadas.

Além disso, esse trabalho irá demonstrar uma metodologia de avaliação de estradas, através de uma tecnologia embarcada nos caminhões fora de estrada denominada VIMS que envia informações em tempo real para que o supervisor responsável por adequação de vias possa atuar prontamente na manutenção das estradas.

Essa tecnologia avalia um espaço amostral da frota de transporte, proporcionando informações de como estão as estradas e em quais locais o ativo está sendo submetido a esforços além do adequado. São quantificados os valores de RAC (*Road Analysis Control*) que demonstram as torções que ocorrem nos chassis dos caminhões quando estes são submetidos a condições críticas na pista. Por exemplo, quando existe uma fissura na pista de fora a fora e o caminhão não tem como desviar, sendo submetido a passar nessa condição inadequada.

1.3 Atividades

- Interação entre as áreas de planejamento de mina, operação de mina e infraestrutura de mina, manutenção e telemetria para definir os papéis de cada área;
- Mapeamento dos principais acessos que necessitam ser reconstruídos ou reabilitados;
- Verificação de *status* do nível de RAC's considerando a frota de caminhões fora de estrada 793D e 793F;
- Definição de rotina de relatório semanal com principais problemas dos ativos para a operação de mina;
- Retorno das áreas sobre quais acessos estão sendo conformados ou reconstruídos semanalmente;
- *Report* da telemetria com os resultados dos trabalhos realizados semanalmente.

1.4 Metodologia

Esse estudo foi preparado inicialmente por uma revisão bibliográfica, avaliando conteúdos de planejamento, projeto e construção de estradas. Logo, houve a necessidade da interação das áreas de planejamento, operação e infraestrutura de mina, manutenção e telemetria, a fim de que todas as pessoas envolvidas nesse processo possam participar da avaliação do status da mina e do que pode ser melhorado. Depois foram identificados na mina os materiais usados atualmente para a construção das estradas de mina. Foi construído então um fluxograma de responsabilidades das áreas, para que semanalmente fossem gerados *reports* das melhorias. A telemetria gerou um relatório completo com todas as informações necessárias para tomadas de decisão, avaliando os resultados de forma qualitativa e quantitativa. Essa metodologia criada através da tecnologia embarcada, gera relatórios semanais para atuação nos pontos críticos e demonstrou-se válida, uma vez que houve redução dos eventos com a realização de melhoria dos acessos. Ainda que houveram melhorias, pode-se perceber que ainda existem outros métodos que podem apoiar em resultados melhores, como a melhor avaliação de materiais para as camadas estruturais.

1.5 Organização da dissertação

A dissertação está dividida em 5 capítulos, sendo que o capítulo 1 contém um resumo de todo o trabalho, com os objetivos a serem atingidos e o método para atingir o resultado.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica que abrange os conceitos geométricos, estruturais e funcionais de estradas de mina. Esse capítulo apresenta também como a tecnologia embarcada VIMS apoia ao engenheiro / supervisor de mina a tomadas de decisão quanto à manutenção de acessos recebendo em tempo real os valores de RAC.

O capítulo 3 apresenta a metodologia empregada nesse estudo, contemplando as áreas envolvidas para ter êxito nos resultados, os materiais utilizados atualmente na mina para construção de acessos e como serão medidos os resultados.

O capítulo 4 apresenta os resultados da tecnologia empregada para quantificação de eventos de RAC, análise qualitativa das vias e quantificação de eventos, os quais diminuiriam após as ações de manutenção nas estradas.

O capítulo 5 possui as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

2 Revisão Bibliográfica

Conforme Thompson *et al*, (1996, *apud* Pellissari, 2019) as estradas de mina precisam ser projetadas considerando as características específicas de cada região, assim como seus aspectos operacionais, tais como: o porte dos equipamentos que irão transitar nas vias, a intensidade de tráfego de veículos, as matérias primas disponíveis em cada região para a construção e manutenção de estradas, a legislação e as normas técnicas associadas.

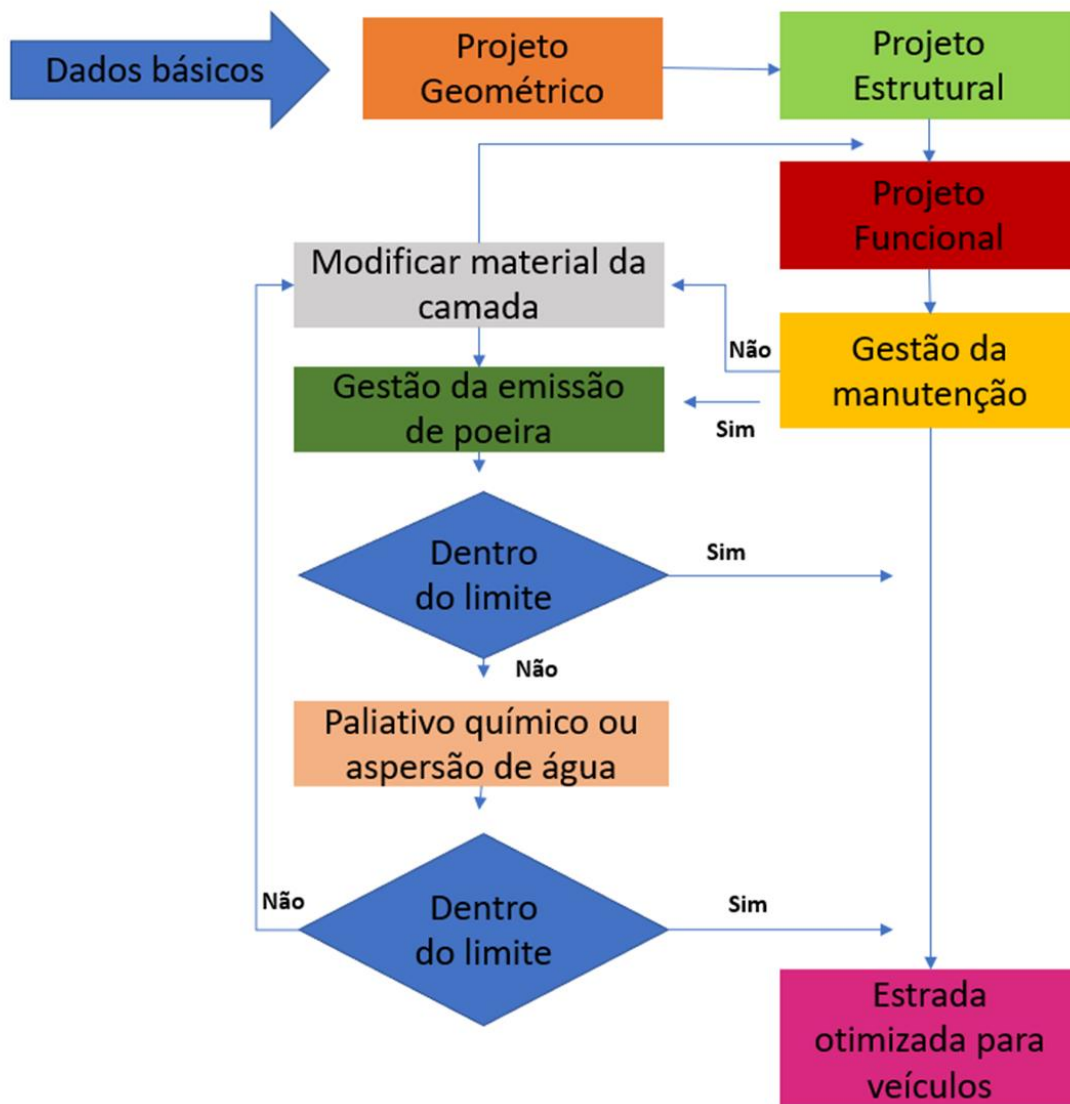
Os acessos têm grande importância para a mineração, pois é dela que depende todo o fluxo de veículos responsáveis pelo escoamento da movimentação de mina, minério e estéril, transportados na mina. Dessa forma, a existência de problemas de diversas naturezas pode estar relacionada com aspectos estruturais e/ou funcionais, que terão como reflexos, a partir do surgimento de deformações de caráter permanente, estreitamentos de pista, deslizamentos, geração de poeiras, e outros, incidindo em incremento de resistência ao rolamento. Portanto, em uma estrada mal projetada pode ter consequências diretas nos custos operacionais da mina (THOMPSON; VISSER, 1996 *apud* PELLISSARI, 2019).

As operações de mineração que utilizam caminhões de transporte para mover produtos devem construir e manter uma rede de estradas nas quais o ativo pode operar. À medida que o desenvolvimento da mina avança, normalmente os acessos mudam e a manutenção de uma estrada de mineração pode influenciar a produtividade da mina e, especificamente, o consumo de combustível do caminhão de transporte na mina. A classe atual de caminhões de transporte da classe Ultra pode ter uma massa bruta de 450t a 590t com motores de 60lt a 90lt desenvolvendo 1.830kW a 2.800kW. Ao gerenciar a rugosidade das estradas de mineração, a resistência ao rolamento dos caminhões de transporte pode ser controlada/gerenciada dentro de uma faixa definida e, portanto, a mina pode controlar parte do consumo de combustível do caminhão de transporte. Por outro lado, a manutenção constante das estradas da mina afeta a produtividade da mina. Normalmente, a decisão de realizar o trabalho de manutenção em uma estrada de transporte é feita subjetivamente, com base na sensação de quão irregular as estradas estão ficando (RICHARDSON & McIVER, 2015).

De acordo com Soares *et al.*, (2012), o pavimento é composto por camadas de revestimento, que possui caráter funcional, além de base e sub-base, que possuem papel estrutural. Essas camadas são projetadas e construídas acima do material *in-situ* (chamado subleito), em casos específicos onde não há nivelamento, pode haver uma camada de enchimento.

Thompson e Visser, (2006) definiram que um projeto de pavimento ou estruturas viárias pode ser dividido em categorias e subcategorias sendo essas o projeto geométrico, o projeto estrutural, o projeto funcional e a manutenção da via. Cada uma das etapas do processo de construção e manutenção de estradas está apresentada na Figura 1. Conforme Soares *et al.*, (2012) o projeto estrutural é o que tem sido menos utilizado por exigir uma informação e conhecimento pouco disponível no contexto da mineração.

Figura 1: Fluxograma para o projeto de vias.



Fonte: Adaptado de Pellissari (2019).

Conforme Thompson & Visser, (2014), na fase de projeto geométrico são definidos o dimensionamento de largura da via, altura da berma, raio de curvatura, inclinação longitudinal e transversal da via, que são projetados e calculados a partir de dados das características dos equipamentos em trânsito na mina, drenagem de água, normas e elementos de segurança. No projeto estrutural, tanto a espessura quanto o material utilizado para compor a camada de base são selecionados conforme a necessidade de atenuação da carga imposta pelos veículos que ali transitam ao longo da vida útil da via. O projeto funcional remete à camada de revestimento da via, ou seja, a camada superficial colocada acima da base para isolar o pneu dos veículos que transitam

na via do contato com a camada de base, geralmente composta por material mais grosseiro. É avaliada a resistência ao rolamento, escoamento de água, tamanho de partículas, entre outras características a serem avaliadas na hora de dimensionar e selecionar o material de revestimento. Em seguida, serão detalhadas as etapas de construção das estradas.

2.1 Projeto geométrico

No projeto geométrico são definidas as condições operacionais das estradas e as dimensões adequadas ao tipo de equipamentos. Os elementos geométricos de uma estrada, quando bem projetados, proporcionam benefícios quanto ao custo, ao desempenho e menores manutenções na estrada. Tannant & Regensburg (2001 *apud* Pellissari, 2019) afirmam que as operações de carregamento e transporte representam aproximadamente 60% dos custos operacionais, comparados a todos os processos relacionados.

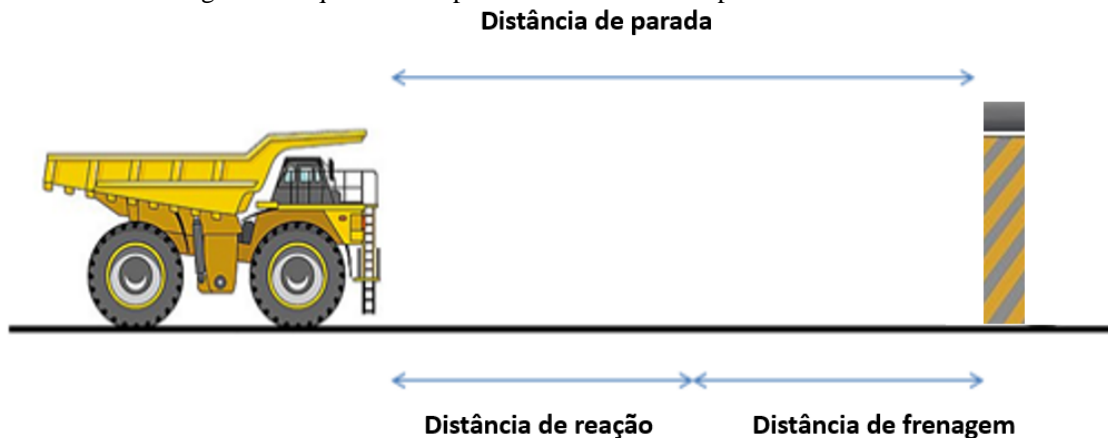
O projeto geométrico precisa correlacionar os seus elementos físicos com as características de operação, frenagem, aceleração, condições de segurança, levando em conta as condições que levem ao maior rendimento dos equipamentos de transporte (SOUZA, 2011). Os principais parâmetros que devem ser dimensionados para o projeto geométrico são:

- Distância de parada;
- Inclinação longitudinal de rampas;
- Distância de visibilidade;
- Leiras (bermas) de segurança;
- Largura de via;
- Superelevação de curvas;
- Raio de curvatura;
- Superlargura de curvas;
- Interseção entre elementos geométricos;
- Inclinação transversal para direcionamento de drenagem.

2.1.1 Distância de parada

Fambro et al., (1997 *apud* Pelissari, 2019) afirmam que a distância de parada é a distância necessária para que o condutor do veículo pare com segurança, desde o momento inicial em que o obstáculo foi visto, considerando o tempo de reação do condutor e o tempo de frenagem do veículo. Fazem parte da distância de parada a distância de percepção e reação e a distância de frenagem, ou seja, a distância de parada corresponde à soma da distância de reação com a distância de frenagem. A distância de percepção e reação representa a distância que o condutor percorreu desde quando observou o obstáculo e reagiu de forma a acionar o sistema de freio do equipamento que está conduzindo. A distância de frenagem é a distância percorrida do veículo desde o momento de acionamento do sistema de frenagem até a parada completa do equipamento.

Figura 2: Esquema exemplificando a distância de parada de um veículo.



Fonte: Autor.

A distância de parada referida por Thompson & Visser (2014) é expressa pela equação:

$$Sd = \frac{1}{2} + \sin\theta + vo * t + \left(\frac{(g * t * \sin\theta + vo)^2}{2 * g(Umin - \sin\theta)} \right) \quad (1)$$

Onde:

g=aceleração da gravidade (m/s²)

t=tempo de parada(s)

θ =grade da rampa, positivo para baixo (graus)

o=velocidade do veículo (m/s)

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

O tempo de parada (t) demonstrado na equação 1, é composto pelo tempo de reação do operador e o tempo de frenagem, do equipamento, respectivamente.

2.1.2 Raio de curvatura

O mal dimensionamento de um raio de curvatura pode ocasionar um esforço maior dos eixos dos veículos de transporte, danificando a camada funcional e possuindo relação direta com a velocidade do veículo na própria curva. Assim, o raio de curvatura é um elemento geométrico importante a ser analisado pelo projetista, uma vez que esse cálculo é utilizado para projetar outros elementos geométricos da estrada (PELLISSARI, 2019).

Os raios de curvatura horizontal são os menores raios das curvas que podem ser percorridos com a velocidade diretriz e a taxa máxima de superelevação, em condições aceitáveis de segurança e conforto (DENER, 1999). O raio de curvatura pode ser calculado de acordo com a Equação 2, priorizando um raio mais suave possível. Para realizar esse cálculo, os coeficientes de atrito podem ser estimados de acordo com a Tabela 1.

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

Onde:

v = velocidade de projeto do veículo (km/h);

e = superelevação (m/m de largura de estrada);

f = coeficiente de atrito entre os pneus e a superfície da estrada (adimensional).

Tabela 1: Valores típicos de coeficientes de atrito conforme a característica do tipo de material encontrado na superfície de estradas.

Natureza da pista	Coefficiente de atrito f de pneus/pista (t/t)
Pavimento concreto	0.90
Terra firme seca	0.55
Terra solta	0.45
Terra firme úmida	0.45
Areia úmida	0.40
Areia seca e terra solta úmida	0.20

Fonte: 101_RP_MINE_HAULROAD_DESIGN_GEOMETRY (2014).

2.1.3 Superelevação

A superelevação é definida como a inclinação transversal da pista nas curvas horizontais. Estas elevações têm o propósito de criar um componente de força no veículo no sentido da curva que, junto à força de atrito, produz a força centrípeta, ou seja, a

inclinação compensa o efeito da força centrífuga nos veículos, assegurando condições de conforto e segurança (DNIT, 2006).

Assim, conforme Pellissari, (2019), a superelevação é uma modificação na pista com uma inclinação transversal nas curvas, que pode ser calculada pela Equação 3.

$$e = \frac{V_o^2}{127 * R} - f \quad (3)$$

Onde:

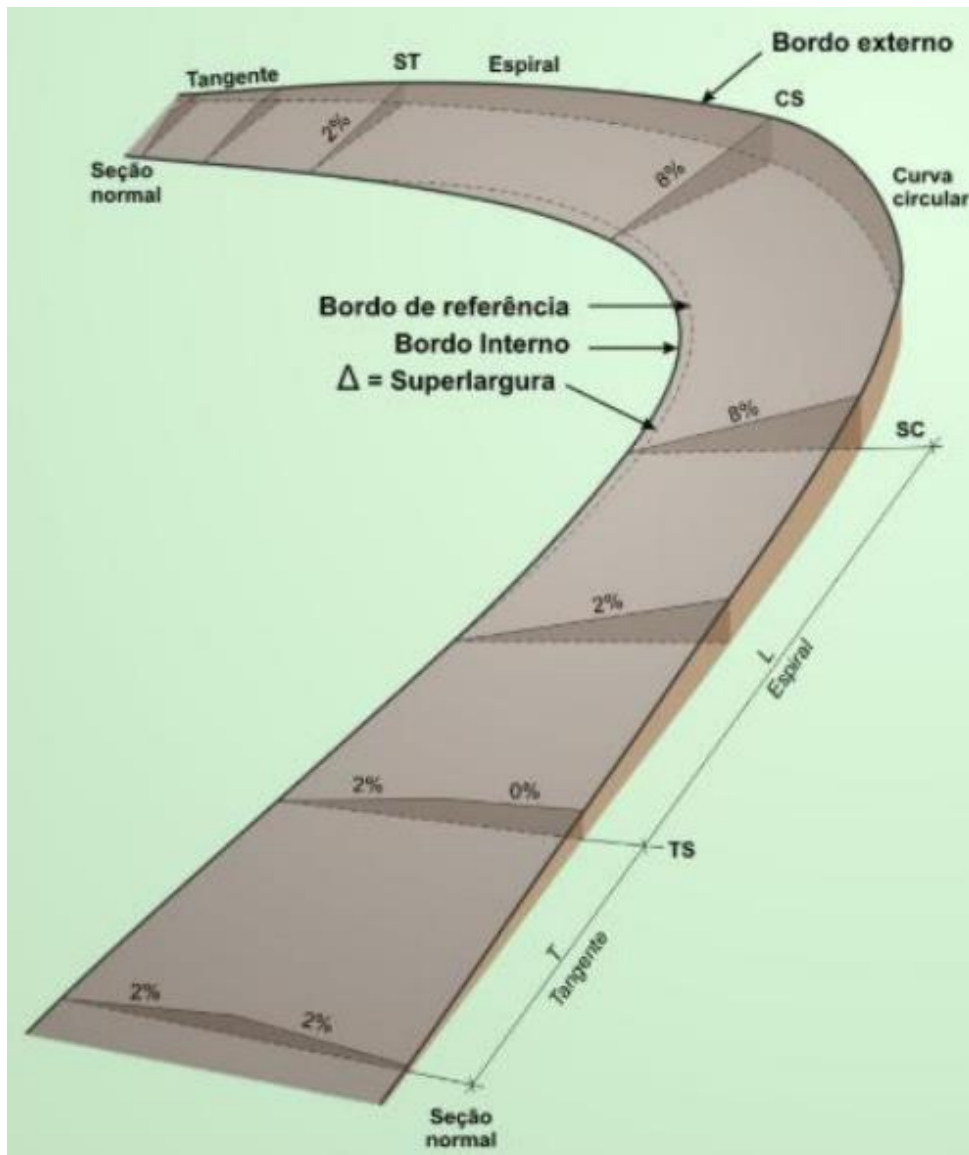
V_o = velocidade do projeto do veículo (km/h);

R = Raio de curvatura (m);

f = Coeficiente de atrito (adimensional).

Na Figura 3 é apresentado o exemplo de uma superelevação em um trecho curvo, onde podemos observar que, inicia com uma seção normal e no momento que se aproxima da seção circular da pista começa uma inclinação de 2%. Esta inclinação vai subindo gradativamente até atingir seu valor máximo no centro da curvatura circular, após atingir este valor de inclinação máxima ela começa a reduzir gradativamente a inclinação até atingir as condições normais de pista.

Figura 3: Superelevação em uma pista.



Fonte: Retirado de Pellissari, (2019 *apud* Dener, 1999).

A superelevação das vias pode ser obtida de outra maneira pela Tabela 2, apresentada por Thompson e Visser (2014).

Tabela 2: Superelevação em função da velocidade do veículo e do raio de curvatura.

Raio da curva (m)	Velocidade e superelevação								
	15km/h	20km/h	25km/h	30km/h	35km/h	40km/h	45km/h	50km/h	55km/h
50	0,035	0,060	0,090						
75	0,025	0,045	0,070	0,090					
100	0,020	0,035	0,050	0,075	0,90				
150	0,020	0,025	0,035	0,050	0,065	0,085			
200	0,020	0,020	0,025	0,035	0,050	0,065	0,080		
300	0,020	0,020	0,020	0,025	0,035	0,045	0,055	0,065	0,080
400	0,020	0,020	0,020	0,020	0,025	0,035	0,040	0,050	0,060
500	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,025	0,030	0,040	0,050

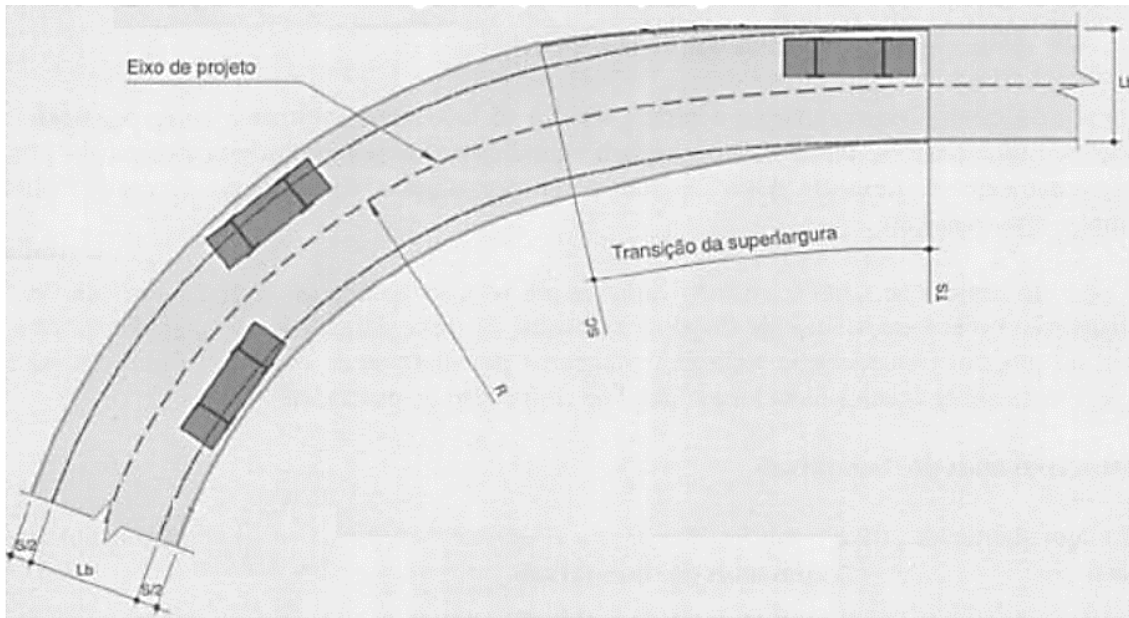
Fonte: Thompson e Visser, (2014).

2.1.4 Superlargura em curvas

A superlargura em curvas é uma largura somada à pista em trechos de curva, a fim de assegurar aos veículos condições de segurança. De acordo com DNIT (2006 *apud* Pellissari, 2019), a superlargura pode ser realizada de duas formas sendo essas o alargamento assimétrico da pista e o alargamento simétrico da pista. O alargamento assimétrico da pista é quando a superlargura está disposta no lado interno da curva e a linha de divisão da pista não concide com o eixo do projeto. Já o alargamento simétrico da pista ocorre quando a superlargura é dividida ao meio (sendo uma metade disposta no lado interno da curva e a outra parte no lado externo da curva) e a linha de divisão da pista coincide com o eixo de projeto (DNER, 1999).

A superlargura deve ser projetada quando forem dimensionadas as curvas de vias de acesso para obter melhores condições de segurança e tráfego. A Figura 4 aponta os efeitos da superlargura dos veículos na curva, assim como a necessidade de uma largura de curva maior para evitar ou minimizar a diminuição da velocidade de tráfego, colisões, além de aumentar a visibilidade do condutor e outras situações de inseguranças.

Figura 4: Superlargura em estradas de mina.



Fonte: Modificado de Dner (1999 *apud* Pellissari, 2019).

O exemplo demonstrado na Figura 4 ilustra o desenho geométrico de uma estrada cuja superlargura ocorre de forma simétrica, ou seja, a superlargura está presente em ambos os lados da pista com mesmas medidas de distanciamento. O eixo do projeto é a linha central onde separa os dois lados da pista, a letra R representa o raio da curva, Lb representa a largura básica da pista, e a transição da superlargura é a distância necessária para o acréscimo de largura na pista de forma gradual.

Logo, é possível obter a superlargura pelas Equação 4:

$$S = n \left(R - \sqrt{R^2 - E^2} \right) + \frac{v}{10\sqrt{R}} \quad (4)$$

Onde:

S = Superlargura (m);

N = número de pistas;

R = Raio da curva (m);

E = Distância entre eixos mais afastados;

v = Velocidade de projeto (km/h).

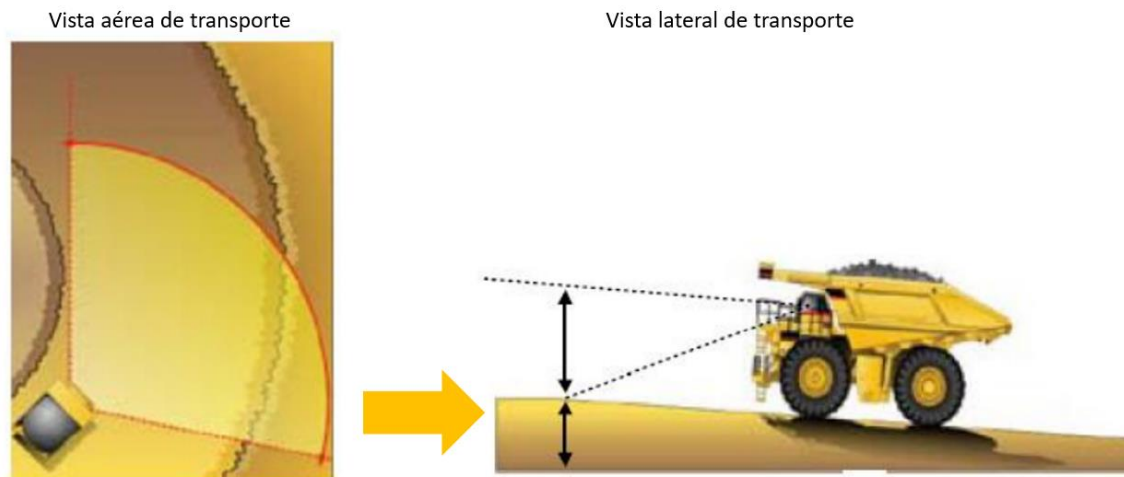
2.1.5 Distância de visibilidade

Conforme Lee (2008 *apud* Pellissari, 2019), a distância de visibilidade compreende o comprimento da pista que é visível pelo condutor do veículo. A distância

de visibilidade do obstáculo deve ser suficiente para que o condutor do veículo consiga parar antes de atingi-lo, tanto na visão vertical quanto na visão horizontal, sendo que a distância que o operador viu o obstáculo deve ser maior ou igual à distância de parada do veículo (CATERPILLAR, 2009).

A Figura 5 demonstra a visibilidade de um condutor quando em situação de curva horizontal e de curva vertical.

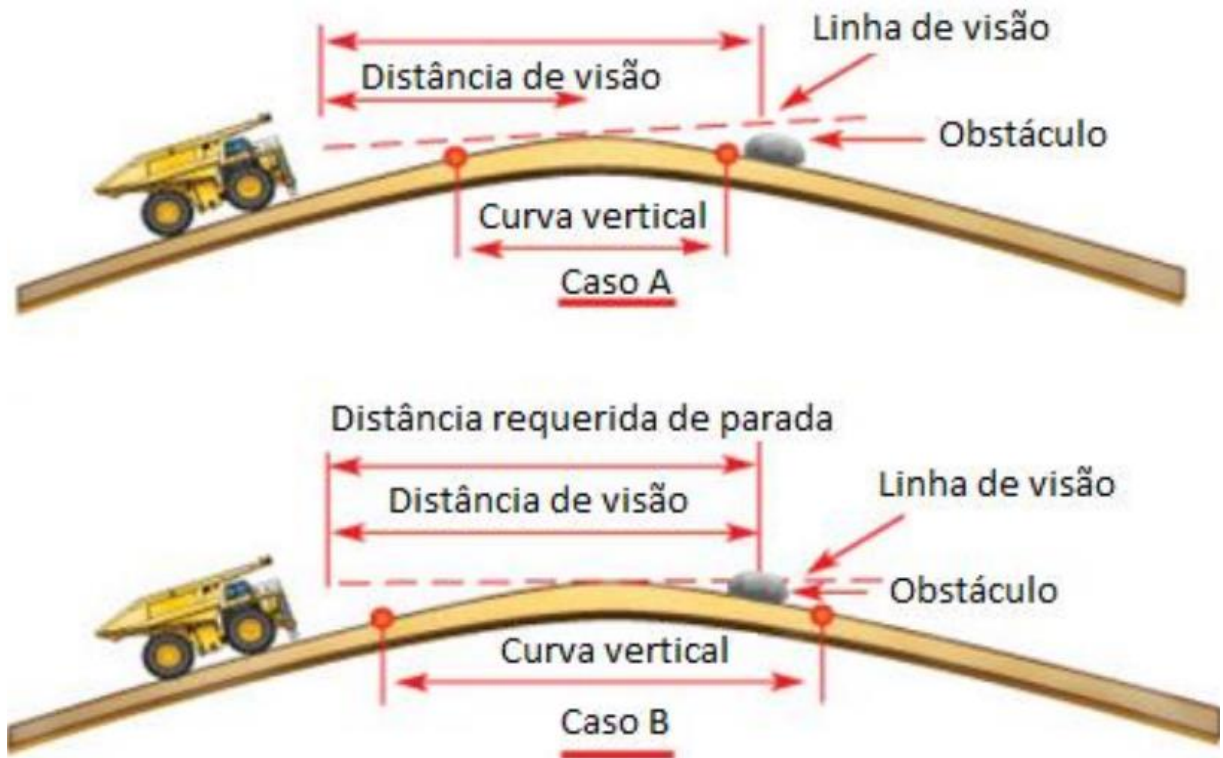
Figura 5: Condições de distância de visibilidade vertical e horizontal de um condutor em uma curva.



Fonte: Adaptado de Caterpillar (2009).

Na Figura 6, a visibilidade do operador do veículo fica comprometida em consequência da curvatura vertical da estrada. Para tal propósito, deve-se considerar a distância da linha de visão e a distância de parada, pois evita que o operador seja surpreendido por um obstáculo, e não tenha uma distância segura para frenagem do ativo. Condição semelhante pode ocorrer em uma curva descendente com posterior ascensão.

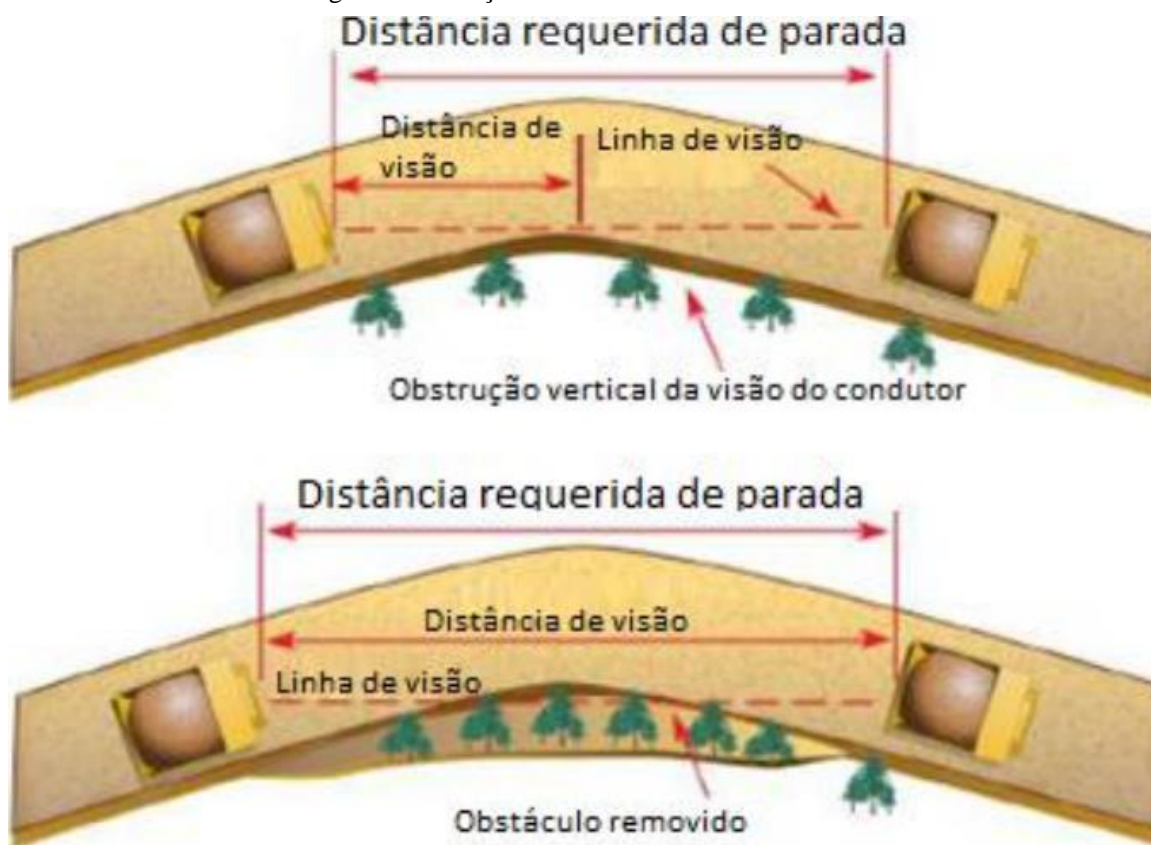
Figura 6: Condições de distância de visibilidade vertical em estradas.



Fonte: Retirado de Caterpillar (2009 a pud Pellissari, 2019).

A Figura 7 demonstra uma situação geométrica horizontal influenciando a visibilidade. Neste caso, a distância mínima para a parada deve ser idêntica à distância de visibilidade para que seja minimizado o risco de colisões devido à falta de visibilidade e tempo de reação do condutor.

Figura 7: Condição de distância de visibilidade horizontal.



Fonte: Retirado de Caterpillar (2009 *apud* Pellissari, 2019).

Thompson e Vissser (2014) afirmam que para a condição da Figura 7, é necessário calcular a distância da curvatura vertical, sendo que, para esse cálculo, considera-se a distância de parada. Se a distância de parada for menor que a curvatura vertical, a Equação 5 é a indicada para o cálculo. Caso seja maior que a curvatura vertical, a Equação 6 é a indicada.

Equação da distância da curvatura vertical caso a distância de parada seja menor.

$$L = \frac{\Delta G \cdot SD^2}{100(\sqrt{h1} + \sqrt{h2})^2} \quad (5)$$

Equação da distância da curvatura vertical caso a distância de parada seja maior.

$$L = 2SD - \left(\frac{200(\sqrt{h1} + \sqrt{h2})^2}{\Delta G} \right) \quad (6)$$

Sendo que para ambas as equações:

SD = distância de parada mínima (m);

h1 = distância do operador acima do piso (m);

h2 = altura do obstáculo (m);

ΔG = diferença algébrica entre inclinações (%).

A Equação 7 é utilizada para o cálculo de afastamento mínimo horizontal. Justifica-se o cálculo desde caso como exemplificado na Figura 7, que na ilustração seria representado pelo recuo das árvores abaixo da estrada da figura.

$$LB = SD \left[1 - \cos \left(\frac{28,65R}{SD} \right) \right] \quad (7)$$

Onde:

LB = afastamento horizontal mínimo (m);

R = raio de curvatura (m);

SD = distância de parada (m).

2.1.6 Largura de pista e leiras de proteção

No Brasil, existem normas regulamentadoras para o exercício da mineração. Para largura da pista leva em consideração o tamanho dos equipamentos e o número de vias que serão consideradas para o tráfego no local.

Em mineração a céu aberto a NR-22 (BRASIL, 1978) determina que as vias de transporte devam obedecer aos seguintes requisitos mínimos:

Os limites externos das bancadas utilizadas como estradas devem estar demarcadas e sinalizadas de forma visível durante o dia e à noite. 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. Nas laterais das bancadas ou estradas, onde houver riscos de quedas de veículos, devem ser construídas leiras com altura mínima correspondente à metade do diâmetro do maior pneu de veículo que trafegue por elas.

A NR-22 determina que, se os itens acima não forem realizados em virtude de impossibilidade operacional ou em virtude do plano de lavra não permitirem tais condições, deverão ser adotados procedimentos e sinalizações adicionais para garantir a segurança na via.

Tannant (2001 *apud* Pellissari, 2019) cita que a largura mínima que uma estrada deve ter, em função da largura do equipamento de transporte e do número de vias, e pode ser descrita pela Equação 8.

$$L = (1,5 * V + 0,5)X \quad (8)$$

Onde:

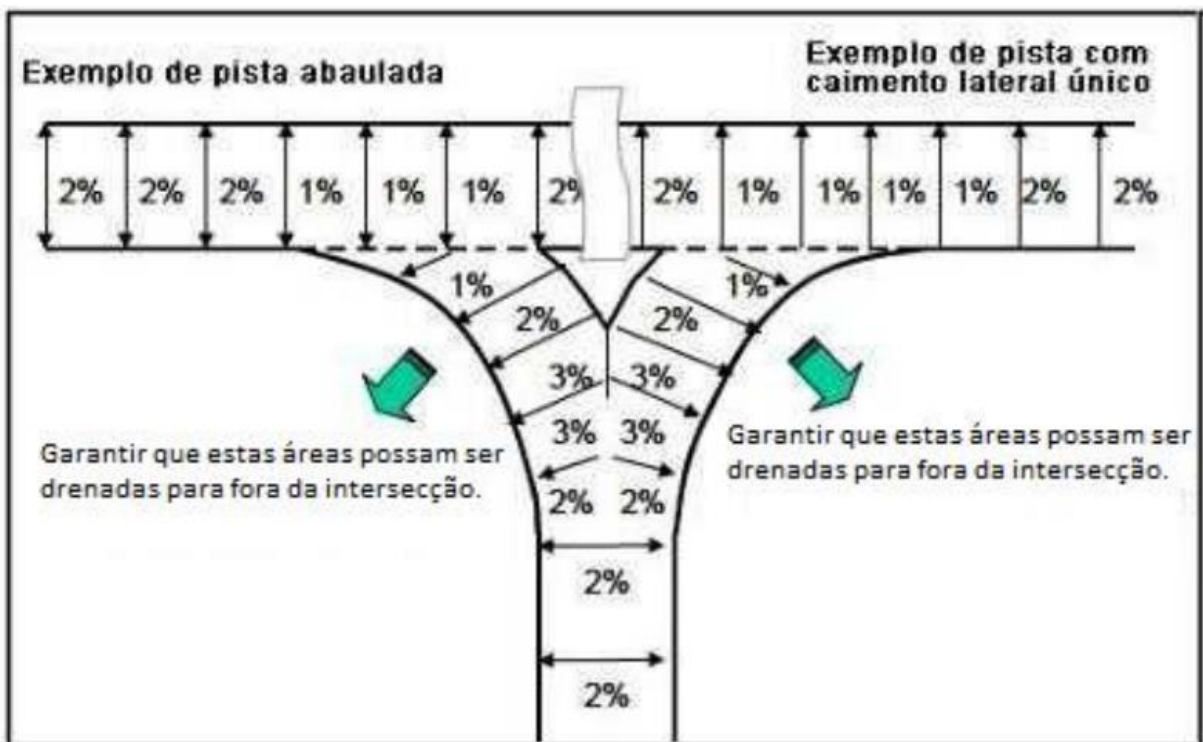
L = largura da estrada (m);

V = número de vias;
X = Largura do veículo (m).

2.1.7 Interseções entre elementos geométricos

Rotatórias, cruzamentos e outros tipos de interseções são elementos de transição entre diferentes vias. Tais elementos devem ser projetados de formas a garantir as melhores condições de tráfego possíveis e segurança (Figura 8).

Figura 8: Esquema de elementos de transição.

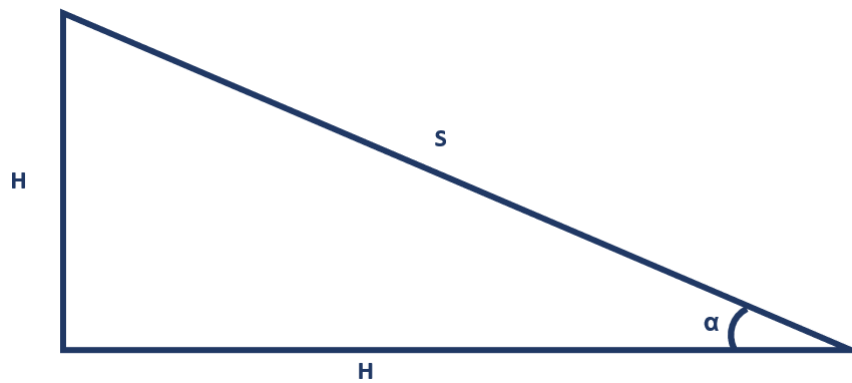


Fonte: Adaptado de Thompson e Visser (2014).

2.1.8 Inclinação Longitudinal

A inclinação longitudinal é a inclinação de determinado trecho da via. A inclinação de determinada parte da via pode ser obtida a partir da divisão do desnível pelo comprimento do trecho. Logo, é uma relação percentual entre o desnível e o comprimento horizontal. Na Figura 9, é possível verificar a relação da inclinação da via.

Figura 9: Exemplo da inclinação de uma via e espessuras analisa das.



Fonte: Autor.

Na Equação 9 pode ser verificado como é calculada a inclinação longitudinal:

$$G(\%) = \left(\frac{H}{C}\right) 100 \quad (9)$$

Onde:

H = Desnível ou distância vertical (m);

C = Comprimento da via ou distância horizontal (m);

S = Distância em superfície inclinada da via (m).

A relação entre a inclinação da estrada e o ângulo de inclinação em relação à horizontal é realizada pela conversão para ângulo, segundo a Equação 10:

$$G(\%) = 100 * \tan \alpha \quad (10)$$

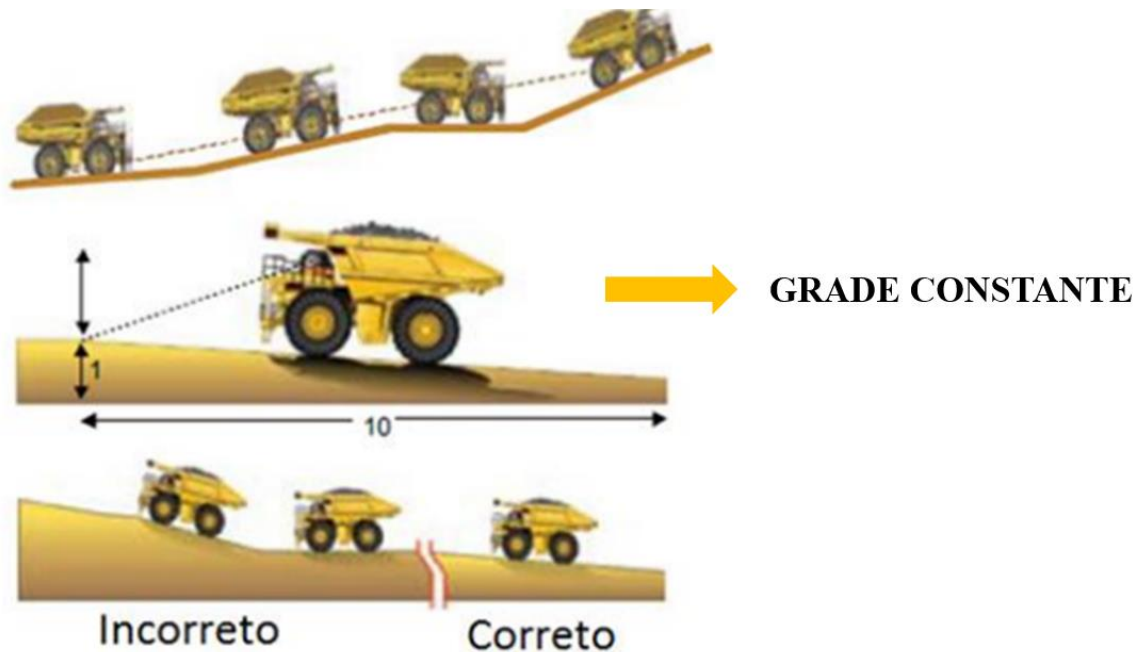
Onde:

α = ângulo entre a superfície da estrada e o plano horizontal (graus), considerando-se a distância horizontal igual a 100 metros.

Nas inclinações longitudinais ascendentes, os valores das rampas são considerados valores positivos e, nas inclinações longitudinais descendentes, os valores são considerados negativos (MACEDO, 2016), de acordo com a Figura 10. É importante que a inclinação longitudinal da estrada seja constante e sem alterações abruptas, pois as alterações prejudicam o desempenho de aceleração e retardo do equipamento de transporte, além de demandar uma mudança constante de marcha o que ocasiona em uma mudança na velocidade do equipamento. Isso pode implicar em maiores custos de

manutenção, podendo levar a uma substituição precoce dos componentes mecânicos dos ativos. Além de efeitos negativos sobre o desempenho dos equipamentos, existe a perda de material com o transbordo ao longo da pista, com conseqüente redução da vida útil dos pneus quando os equipamentos rodam na estrada com material espalhado na pista (THOMPSON; VISSER, 2014).

Figura 10: Inclinação longitudinal constante e inconstante.



Fonte: Adaptado de Caterpillar (2009).

2.1.9 Inclinação e direcionamento de drenagem

Conforme Visser (2014), o direcionamento da drenagem superficial auxilia objetiva evitar que a água acumule na superfície, para evitar situações inseguras. A inclinação da via pode ser realizada de duas formas diferentes. No primeiro caso, a drenagem pode ser direcionada unicamente para um ponto, denominado caimento lateral único, onde a água é direcionada diretamente para o canal de drenagem lateral, conforme a Figura 11 retrata.

A outra forma é a inclinação com abaulamento central ou abaulamento transversal em que a drenagem é direcionada para as duas canaletas laterais, conforme demonstrado na Figura 12 (VISSER, 2014).

Figura 11: Inclinação transversal com caimento lateral único.



Fonte: Adaptado de Caterpillar (2009, *apud* Pellissari, 2019).

Figura 12: Inclinação transversal com abaulamento central.



Fonte: Adaptado de Caterpillar (2009, *apud* Pellissari, 2019).

A inclinação da seção transversal geralmente possui entre 2% e 3%, de maneira que essa inclinação pode ser utilizada em condições nas quais a geometria da escavação permita (THOMPSON; VISSER, 2014). Em caso de pistas irregulares é recomendado que a inclinação transversal possa ser maior para reduzir o tempo de escoamento da água. Em rampas, esta inclinação transversal deve ser mínima, a menos que, se trate de uma região muito chuvosa.

Os tipos de inclinações devem ser escolhidos a partir da facilidade de construção e manutenção que podem ser proporcionadas pelo perfil da via, tanto na facilidade de manutenção da via em si, quanto na manutenção da canaleta de drenagem. Em vias planas, deve-se manter uma inclinação transversal mínima de 2%. Na via, onde o equipamento sobe carregado deve-se manter a inclinação transversal (CATERPILLAR, 2009).

2.1.10 Projeto de drenagem

O projeto de drenagem tem por objetivo o direcionamento das águas superficiais que caem nas vias. Em uma cava a céu aberto uma via é um potencial ponto de interceptação de águas da mina, assim como sua inclinação em determinados trechos da

rede de transporte que proporciona maiores possibilidades de acúmulo de água (THOMPSON & VISSER, 1996 *apud* PELLISSARI, 2019).

Vieira (2013 *apud* Monteiro, 2021) o tratamento do revestimento contra a geração de poeira excessiva, causada principalmente pela abrasão de material particulado, deve ser considerado. Sistemas de aspersão fixa dispostos ao longo das leiras de segurança das estradas e caminhões pipa são usados na redução de poeira. No entanto, a umectação das vias nem sempre é eficiente, devido a fatores como insolação e rápida secagem do pavimento.

A drenagem superficial busca interceptar e captar águas provenientes de áreas adjacentes e aquelas que se precipitam sobre o corpo, conduzindo-as de forma segura ao deságue, resguardando sua estabilidade e segurança. Na drenagem superficial, podem ser utilizadas valetas de proteção de corte e aterro, sarjetas de corte, saídas de água, descidas de água, caixas coletoras, bueiros de grade, dissipadores de energia e caixas de retenção. Para as drenagens profundas usam-se tubos porosos para evitar que a infiltração atinja o subleito (DNIT, 2006).

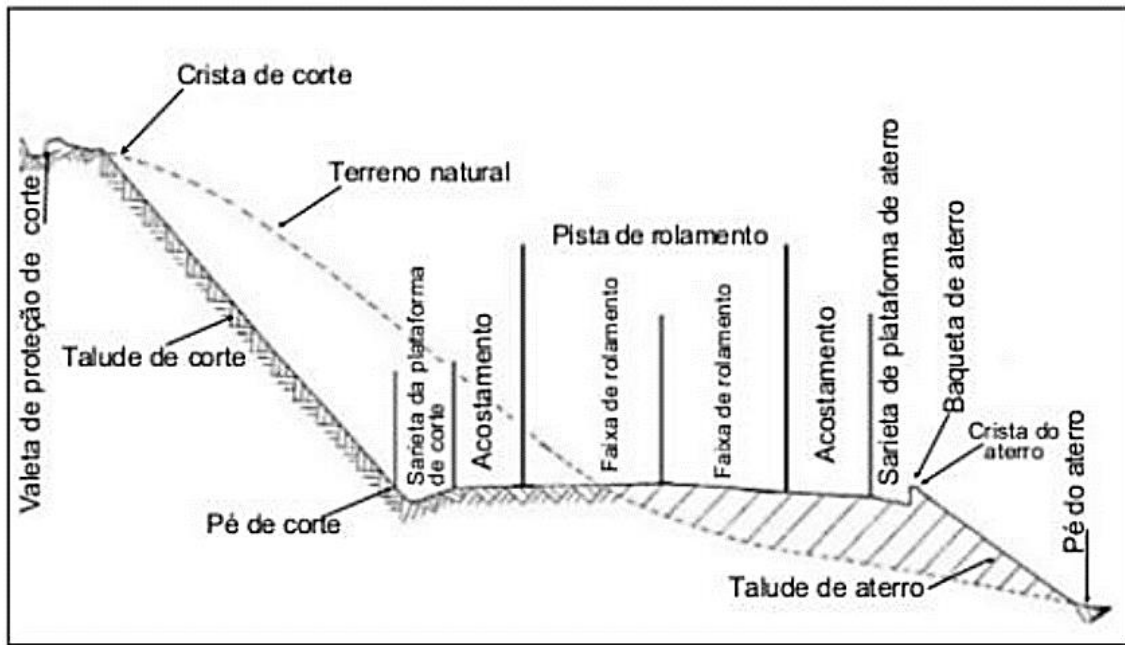
De acordo com Thompson & Visser (2014), para o correto dimensionamento dos elementos de drenagem, devem ser conhecidos os índices pluviométricos e todos os pontos de divisão de fluxo de água e coletores da cava. É importante o dimensionamento dos elementos de drenagem para conferir maior segurança aos ativos que trafegam na via bem como para evitar a deterioração da estrada. Assim, torna-se necessário um projeto de drenagem com os elementos adequados para evitar cenários de insegurança e de redução de produtividade.

2.1.11 Valetas de proteção de corte e aterro

As valetas de proteção são elementos de drenagem construídos paralelas às cristas de taludes ou no pé do talude de aterro, com o objetivo principal de evitar que o fluxo de água atinja a crista, ou pé, e cause erosão.

As valetas podem possuir diferentes seções transversais, variando entre trapezoidal, triangular e retangular (Figura 13).

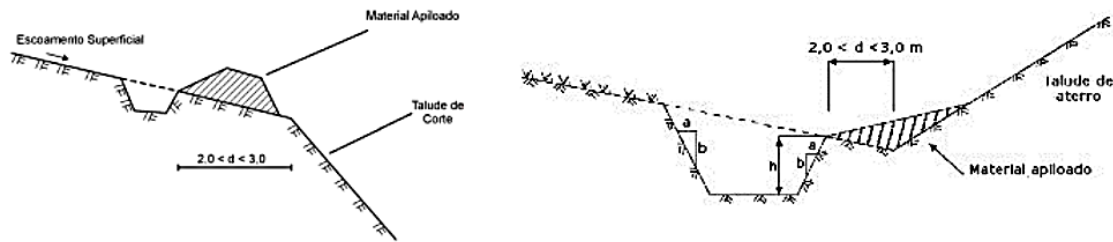
Figura 13: Valetas construídas para drenagem.



Fonte: Retirado de <http://pt.slideshare.net/DanielFXA/manual-de-campanha-estradas-c-538>.

As valetas são divididas em valetas de proteção de corte e de aterro, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14: Valetas de proteção de corte e aterro.



Fonte: DNIT (2006).

Dnit (2006 *apud* Pellissari, 2019) retrata que a valeta de proteção de corte é um dispositivo destinado a interceptar e conduzir as águas precipitadas sobre as áreas adjacentes e que escoam nos cortes, fazendo com que a água atinja, o mínimo possível, a estrada. O objetivo das valetas de proteção de corte é de interceptar as águas que escoem pelo terreno natural a montante, de forma que impeça que atinja o talude de corte. As valetas necessitam ser construídas ao longo dos trechos em corte onde o escoamento superficial proveniente dos terrenos adjacentes possa atingir o talude e comprometer sua estabilidade. As valetas de proteção de aterros podem ter seções trapezoidais ou

retangulares, e têm como função interceptar as águas que escoam pelo terreno a montante, impedindo que a água atinja o pé do talude de aterro, também recebendo águas das valetas de corte.

A seção de cada valeta deve ser dimensionada de forma a atender a vazão recomendada. A construção da valeta deve ser feita imediatamente após o corte ou o aterro. Com intuito de evitar que a estabilidade do talude seja comprometida, é recomendado que durante a construção, o material da escavação da valeta seja usado para construir uma proteção da valeta, onde o material deve ser compactado manualmente para conferir maior estabilidade. Para o revestimento da valeta, os mais recomendados são de cimento e de alvenaria (DNIT, 2006).

2.1.12 Sarjetas de corte e aterro

O principal objetivo da sarjeta de aterro é captar as águas que precipitam sobre a plataforma, evitando que provoquem erosões no talude do aterro e conduzindo-as ao local de deságue seguro. Devem-se utilizar sarjetas de aterro em trechos que a velocidade das águas provoque erosão e em trechos onde, em conjunto com a terraplanagem, seja a mais econômica. Dessa forma, aumenta a altura para o primeiro escalonamento de aterro e interseções (DNIT, 2006).

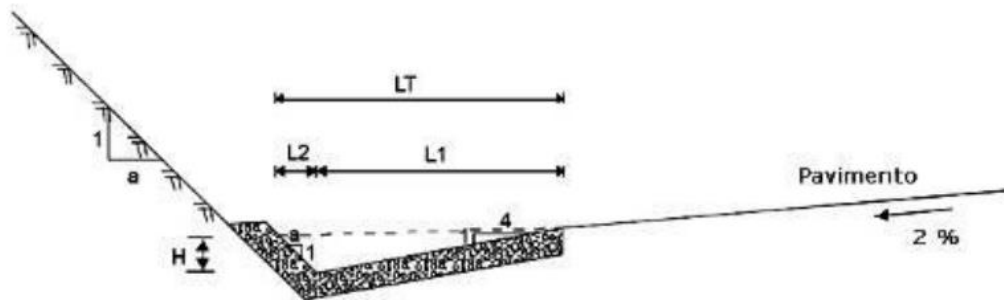
As sarjetas são pequenas escavações realizadas próximas ao pé de um talude, com a função principal de captar água de escoamento proveniente do talude e a água drenada da berma ou da pista lateral. Este é um importante elemento na rede de drenagem de água, pois irá conduzir todo o volume até um ponto de escoamento. Existem vários tipos de seção, que variam dependendo da capacidade de vazão necessária (DNIT, 2006).

Pellissari, (2019) aponta que a sarjeta de corte pode apresentar diferentes seções, sendo as mais comuns a triangular, a trapezoidal e a retangular. Cada geometria difere não apenas na facilidade de execução como também na sua aplicação. A seção triangular é a que apresenta menor raio hidráulico, dessa forma é a seção que deve ser utilizada quando não existe uma grande necessidade de perda de carga hidráulica, dando uma boa vazão para o escoamento.

A execução das sarjetas de corte deve ser imediata após a conclusão do corte do talude. O seu revestimento e sua construção devem ser compatíveis com as características do material que se está trabalhando, de forma a observar a declividade e erosão. O

revestimento adotado pode ser o uso de gramíneas, cascalho, cimento ou alvenaria de pedra argamassada (DNIT, 2016).

Figura 15: Sarjeta de corte.



Fonte: Retirado de DNIT (2006).

2.2 Projeto estrutural

Segundo Hugo (2005 *apud* Pellissari, 2019), o projeto estrutural objetiva o dimensionamento das camadas que compõem o pavimento. As camadas precisam ser capazes de suportar e resistir aos esforços impostos à estrada durante a sua vida útil projetada, fazendo com que sejam minimizadas as necessidades de manutenção da via. O projeto estrutural é um conjunto composto pela formação de camadas considerando a espessura e também os tipos de materiais disponíveis de fácil acesso, sendo compatível com o material *in-situ* e com o volume de tráfego previsto para a vida útil da estrada.

Conforme Peroni & Visser (2015), dentre os elementos de projeto de uma estrada de mina, o projeto estrutural tem sido o menos utilizado, o que pode ser devido à necessidade de uma formação e um conhecimento pouco disponíveis em nosso meio. O estudo teórico do projeto estrutural de dimensionamento de pavimentos é tratado na disciplina Mecânica dos Pavimentos. Nesse campo, a literatura específica, voltada ao dimensionamento de estradas de mina, é bastante escassa. Por esse motivo, em conjunto com outros de outra ordem, principalmente econômica e de segurança ocupacional, a aplicação de conceitos advindos da referida disciplina mostram-se úteis em projetos de estradas de mina (SOUSA *et al.*, 2012).

De acordo com Thompson & Visser (2014) uma via de acesso mineira é uma estrutura viária que é constantemente submetida a grandes esforços. É no projeto estrutural que é feito o dimensionamento das camadas que compõe o pavimento, fazendo

com que estas consigam suportar as cargas superficiais impostas sobre ela. O projeto estrutural precisa considerar o caráter de permanência da via, intensidade de tráfego, peso dos caminhões e a matéria prima disponível para a construção da via. O correto dimensionamento das camadas vai minimizar riscos estruturais e aparições de corrugações, buracos e outros elementos que diminuem a produtividade e aumentam os custos de transporte.

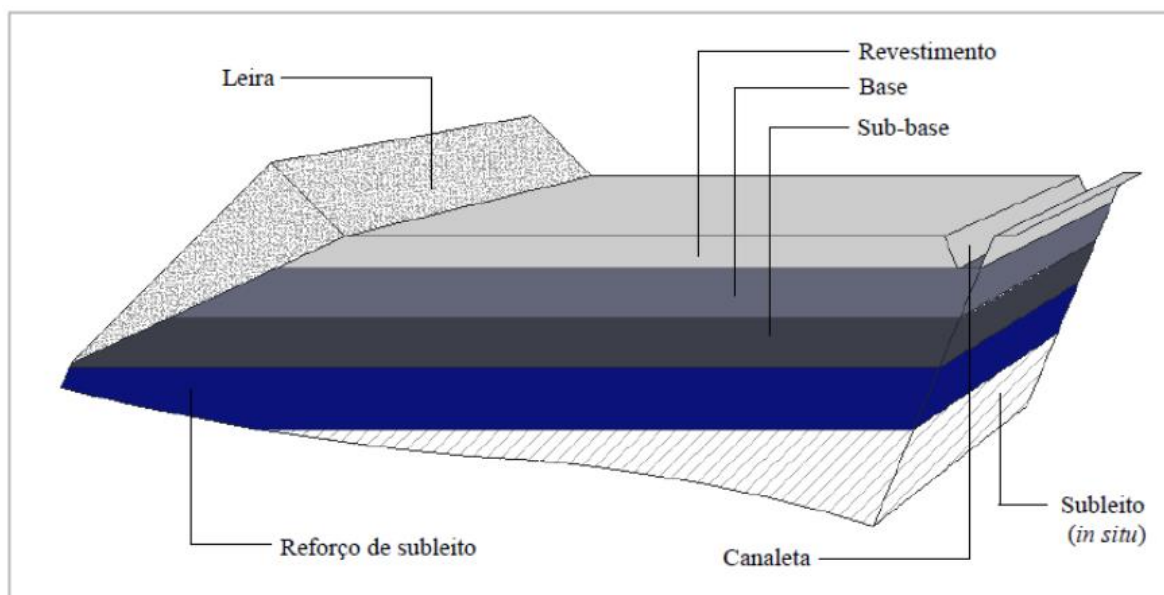
De acordo com Hugo (2005 *apud* Sousa et al. (2012) o projeto estrutural objetiva o dimensionamento das camadas que irão compor o pavimento. A capacidade de suporte dessas camadas deve resistir aos carregamentos impostos à estrada durante a sua vida útil de projeto, reduzindo, na medida do possível a necessidade de manutenções excessivas.

2.2.1 Camadas do pavimento

As camadas apresentam uma característica peculiar e importante no desempenho do pavimento. Assim, a mudança de porte de equipamentos desse ser considerada como uma condição crítica, principalmente para o projeto estrutural, demandando que novos estudos sejam feitos para que as vias de acesso não sejam comprometidas por deformações excessivas (MACEDO, 2016).

Os principais elementos estruturais de uma camada podem ser vistos na Figura 16.

Figura 16: Principais camadas de um pavimento.



Fonte: Retirado de Sousa (2011).

Segundo Sousa *et al.* (2012), reforça ainda que o projeto estrutural é um processo de composição do arranjo mais econômico das camadas do pavimento, levando em consideração a sua espessura e tipos de materiais disponíveis, que seja compatível com o material *in situ* e com o volume de tráfego previsto para a vida útil dos acessos.

O pavimento dimensionado é constituído de camadas de revestimento, base e sub-base, que são construídas acima do terreno normalmente formado pelo subleito *in situ*. O revestimento tem papel e propriedades funcionais, enquanto as outras camadas possuem papel estrutural (SOUSA *et al.*, 2012).

A camada do revestimento deve formar uma capa de rolamento que seja, tanto quanto possível impermeável, e resistente para suportar o tráfego de veículos. Um revestimento correto para a construção de uma estrada de mina precisa apresentar características como a diminuição de poeira em períodos que sejam secos, evitar que em períodos de chuvas, a pista fique escorregadia, e esteja adequada à trafegabilidade em condições climáticas variadas além de ter um baixo custo sem a necessidade de muita manutenção (THOMPSON & VISSER, 2014).

Segundo Thompson e Visser (2014), a base é a camada localizada abaixo da camada de revestimento, cuja função é de resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos que ali transitam, distribuindo-os ao longo da camada de sub-base. Esta camada deve apresentar como característica uma grande densidade e estabilidade. Além disso, a base é responsável por proteger a sub-base de deformações elevadas. O dimensionamento ou execução incorreta da construção da base poderá provocar entre outros problemas defeitos estruturais graves ocasionando deterioração prematura da estrada.

A sub-base é uma camada situada entre a base e o material *in-situ*, sendo que a sub-base pode, ou não, existir no projeto da via DNIT (BRASIL, 2006).

O subleito ou material *in-situ* é a camada que corresponde ao terreno de fundação do pavimento. Esta estrutura deve suportar toda a capacidade de carga das camadas superiores, porque quando há a deformação plástica de um subleito em função da carga aplicada sobre o pavimento este é um forte indício de que as camadas do pavimento não possuem uma espessura suficiente que limitam as tensões de cisalhamento no subleito aos valores compatíveis com a resistência ao cisalhamento do solo conforme indicação do DNIT (BRASIL, 2006).

2.2.2 Dimensionamento das camadas

O dimensionamento das camadas que compõem a via pode ser feito através da utilização de três métodos: metodologia CBR feita em laboratório, CBR de campo, e CBR obtido através do método mecanístico. De acordo com Thompson & Visser (1996 *apud* Pellissari, 2019) metodologias de dimensionamento de camadas receberam mais atenção a partir de 1920, porém estas técnicas foram desenvolvidas especialmente para as vias pavimentadas.

2.2.3 CBR de laboratório

O método *California Bearing Ratio* (CBR) foi desenvolvido pelo departamento de estradas da Califórnia após estudos demonstrarem que a grande maioria das falhas identificadas nos pavimentos era devido à compactação inadequada dos materiais que compunham as camadas ou por camadas com espessura insuficiente sobre material *in-situ* fraco.

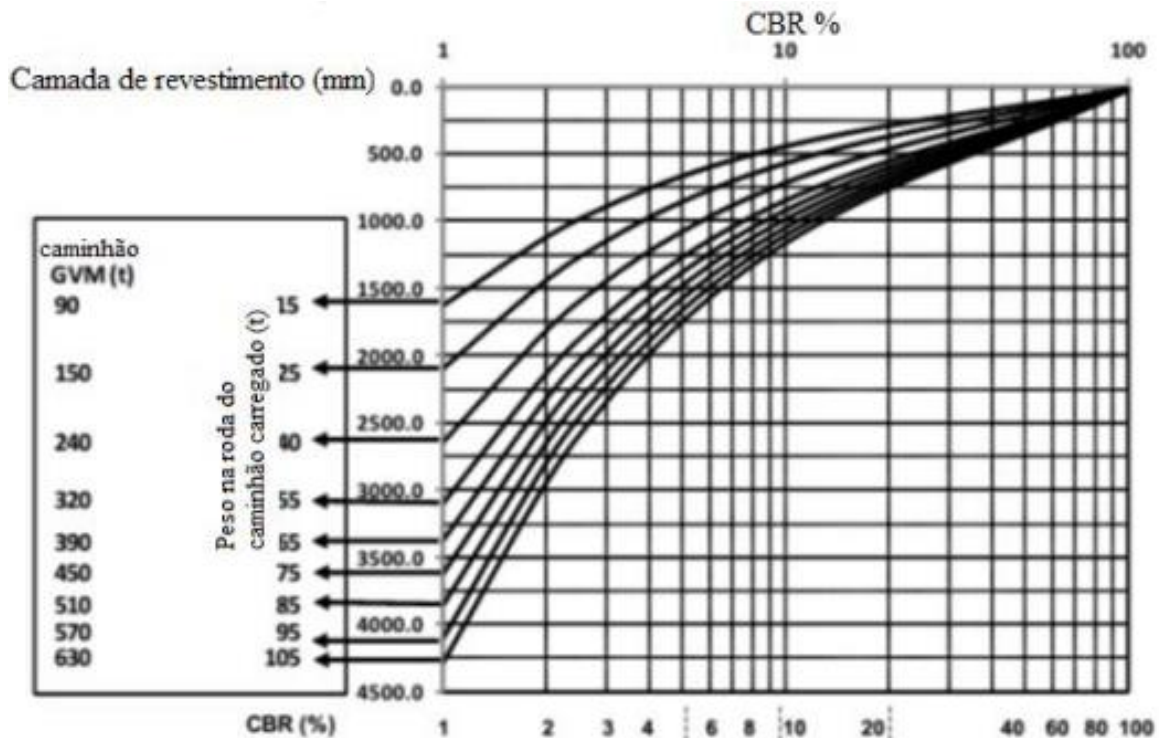
De acordo com Hustrulid e Kuchta (2013), o CBR é um índice desenvolvido a partir da razão percentual entre a pressão exercida pelo mesmo atuador hidráulico em uma amostra de referência. A amostra de referência é brita, bem graduada de alta qualidade, que tem um CBR de 100%. Neste método, todos os materiais são ensaiados em laboratórios e são geradas curvas que correlacionam o CBR do material e a carga exercida sobre os pneus a uma dada espessura de camada. Desta forma, são determinadas as espessuras das camadas do revestimento, da Base e da Sub-base.

Conforme Sousa *et al.*, (2012), o dimensionamento das camadas é realizado tomando-se como referência o ábaco apresentado por Tannant e Regensburg (2001), para carga de roda, que tem por base, a aplicação da teoria da elasticidade. Nesse ábaco, são traçadas curvas contendo os valores CBR do material ensaiado contra a espessura da camada para vários carregamentos de roda. Determina-se a espessura total do pavimento, que deverá ser construído sobre o subleito. Também são determinadas as espessuras das camadas de sub-base e base.

Como citado por Thompson e Visser (2014), é possível observar o ábaco com as curvas de CBR correlacionadas com a carga exercida sobre cada um dos pneus com a espessura da camada de revestimento. A carga exercida pelos pneus é o chamado CVW

(Gross Vehicle Weight), sendo este o peso máximo do caminhão carregado dividido pelo número de pneus (Figura 17).

Figura 17: Valores e CBR em função do peso do caminhão.



Fonte: Adaptado de Thompson e Visser (2014).

Conforme Thompson & Visser (1996 *apud* Pellissari, 2019), o método CBR de laboratório possui vantagens relacionadas a uma metodologia de simples utilização e rápida obtenção de dados, com boas aproximações para pequenas pressões sobre rodas, não infringindo critérios de dimensionamento para pistas de caráter temporário. As principais desvantagens estão relacionadas à base teórica fundamentada na teoria de camada única semi-infinita de Boussinesq, a qual assume um módulo de elasticidade constante para o material. Como vias de transporte de minas consistem de várias camadas de diferentes materiais, cada um destes materiais apresenta um comportamento elástico distinto. Outra desvantagem do método CBR é o fato de ele ser baseado em informações empíricas para veículos com carga máxima sobre eixos de 80 kN. Porém, em vias de mineração, os valores de cargas podem ser de até 25 vezes maior.

As principais etapas para determinar a espessura de camadas de estradas são divididas em seis fases. A primeira etapa consiste na obtenção do CBR através de procedimentos laboratoriais para cada um dos materiais e irão compor as camadas de

revestimento, base e sub-base, bem como ensaiar o material do subleito. Outra possibilidade de obter o CBR é através de materiais pré-ensaiados e com respectivo CBR determinado na bibliografia (THOMPON & VISSER, 2014).

A segunda etapa refere-se á determinação da carga de roda. Nesse momento, deve-se conhecer os equipamentos que irão rodar nas redes de transporte. O peso total do equipamento que deve ser considerado é o peso total do veículo carregado dividido pelo número de rodas que o equipamento possui. Assim, é possível obter o valor do carregamento máximo em cada um dos pneus. Considerando que existem veículos com número diferente de rodas por eixo, utiliza-se o pneu com a maior carga para fins de cálculo.

Na terceira etapa ocorre a definição da espessura total da camada. Utilizando o CBR obtido pela carga dos pneus e da característica do subleito, define-se quanto deve ser a espessura total das camadas que compõem a via. A espessura obtida do gráfico é a espessura da camada, desde a superfície da via até o topo do subleito.

Na quarta etapa é realizada a definição da espessura da camada de sub-base a partir do CBR determinado pelo material e pela carga exercida pelos pneus. O valor obtido do gráfico é a espessura desde a superfície da via até o topo da sub-base.

A quinta etapa consiste na definição da espessura da camada de base a partir do CBR determinado pelo material e pela carga exercida pelos pneus. O valor obtido do gráfico é a espessura desde a superfície da via até o topo da base.

Na sexta etapa, é possível definir a espessura da camada de revestimento. Com esse objetivo, deve-se preencher a espessura faltante obtida na terceira etapa, sendo que esta espessura deve ser jogada no ábaco com a carga de pneus considerada anteriormente e verificado o CBR necessário para atender o projeto. Thompson e Visser (2014) apontam que essa camada deve ter um valor de CBR acima de 80%.

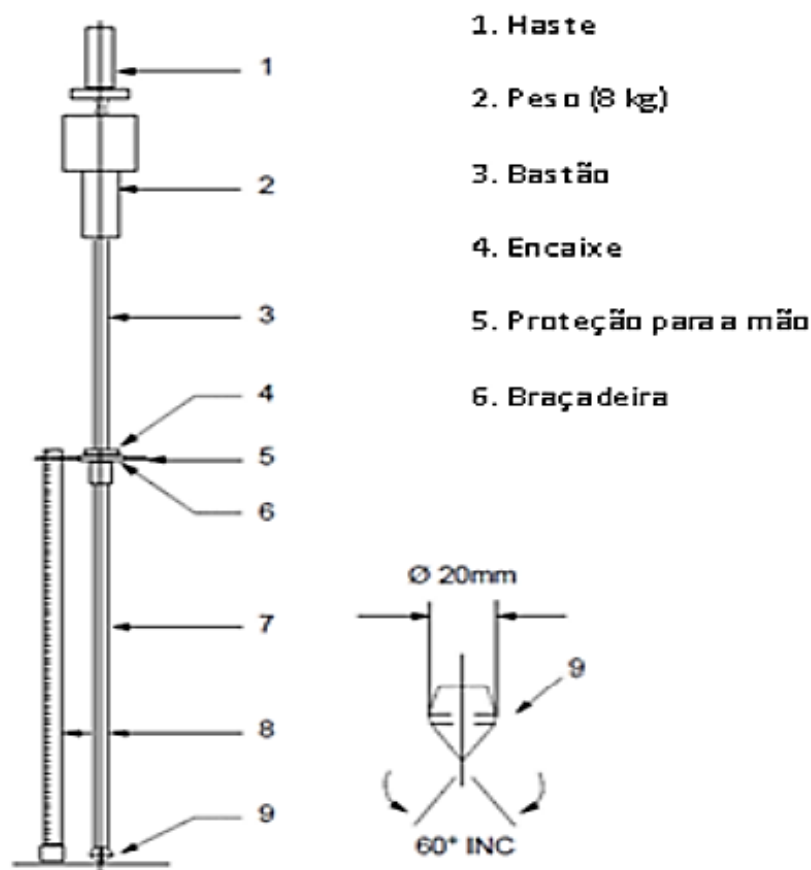
2.2.4 Análise de CBR de campo por DCP

Conforme Thompson e Visser (2014) o método CBR de campo utiliza o DCP – *Dynamic Cone Penetrometer*, um instrumento que serve para determinar o CBR a partir da quantidade de golpes, mensurando a taxa de penetração do equipamento no material ensaiado in situ. Esta metodologia não necessita que sejam feitas análises em laboratório, reduzindo os custos. Constitui um método de fácil obtenção de informações de campo e pode ser utilizado amplamente em locais de mineração. Apesar desse método ter sido

desenvolvido para analisar pavimentos já construídos, pode ser também utilizado para a construção de novos pavimentos.

O instrumento é constituído na sua parte superior por uma empunhadura, imediatamente abaixo possui um peso cilíndrico de 8 kg, que se desloca para cima e para baixo em haste, com uma extremidade construída por um cone em angulação de 60° e diâmetro máximo de 20 mm. O peso é solto de uma altura de 575 mm, caindo sobre um disco que transfere a energia da queda para a haste. Na lateral do instrumento existe uma régua usada para determinar a taxa de penetração do instrumento (THOMPSON; VISSER, 2014). Há uma representação esquemática do equipamento do DCP na Figura 18.

Figura 18: Desenho esquemático de DCP.

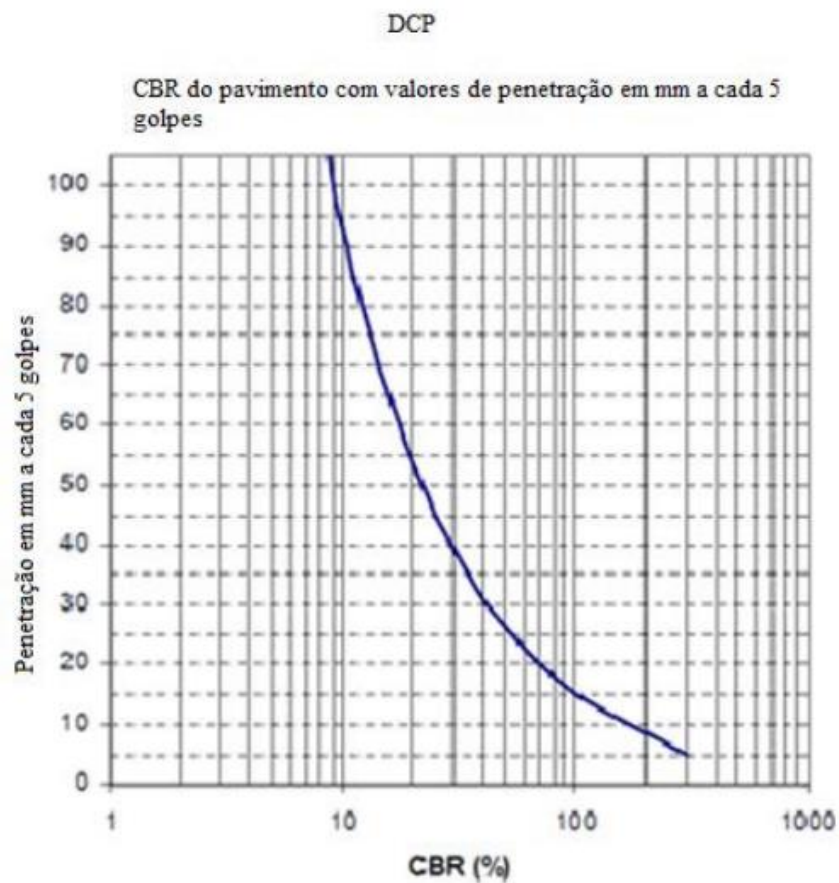


Fonte: Retirado e modificado de Thompson e Visser (2014).

As etapas para a obtenção do CBR pelo método de campo são determinadas pela determinação dos materiais a serem utilizados. Logo, são realizados testes em que o equipamento de DCP penetra no solo, sendo realizadas as medições das penetrações em

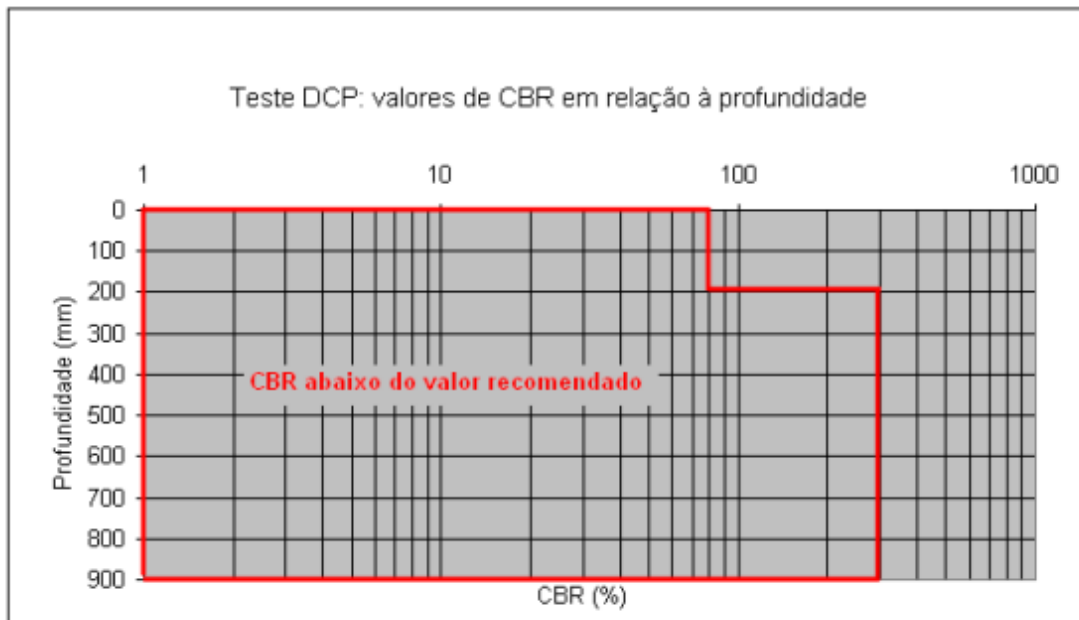
mm para uma quantidade de cinco golpes. O procedimento é realizado várias vezes até a penetração parar ou até o comprimento da haste permitir. Em seguida, os valores médios obtidos pelo ensaio são jogados na curva padrão para obtenção do CBR do material, como mostra a Figura 19. Após a obtenção dos valores de CBR, são definidas as profundidades de cada uma das camadas da via (THOMPSON; PERONI; VISSER, 2020) a partir do gráfico, Figura 20, com as recomendações de espessura de camada segundo CBR.

Figura 19: Ábaco que correlaciona os golpes com o CBR.



Fonte: Fonte: Retirado de Thompson e Visser (2014).

Figura 20: Recomendação de profundidade se a cordo com CBR.



Fonte: Retirado de Thompson e Visser (2014).

2.2.5 Método mecanístico

Pellissari, (2019) cita que apesar de utilizar alguns elementos empíricos, o método mecanístico apresenta uma abordagem a partir da mecânica estrutural que compõem as camadas de uma via. As vantagens de se utilizar uma abordagem mecanística residem na habilidade de acomodar diferentes cargas e os seus impactos na performance estrutural da via e na habilidade de utilizar materiais disponíveis para a construção de forma mais eficiente.

Além disso, existe a vantagem de acomodar novos materiais, previsões de performance de via mais confiáveis, uso de propriedades de material de projeto relacionadas com o desempenho estrutural e melhor definição de propriedade de camadas de vias já existentes.

2.3 Projeto funcional

Thompson & Visser (2003 *apud* Pellissari, 2019) relatam que o projeto funcional abrange a parcela do projeto preocupada com a definição das características de redução de resistência ao rolamento, aderência adequada em condições com água, boas características de selante. O objetivo do projeto funcional é evitar a percolação de águas

na base e na sub-base, reduzir a taxa de deterioração das vias e reduzir a emissão de particulados.

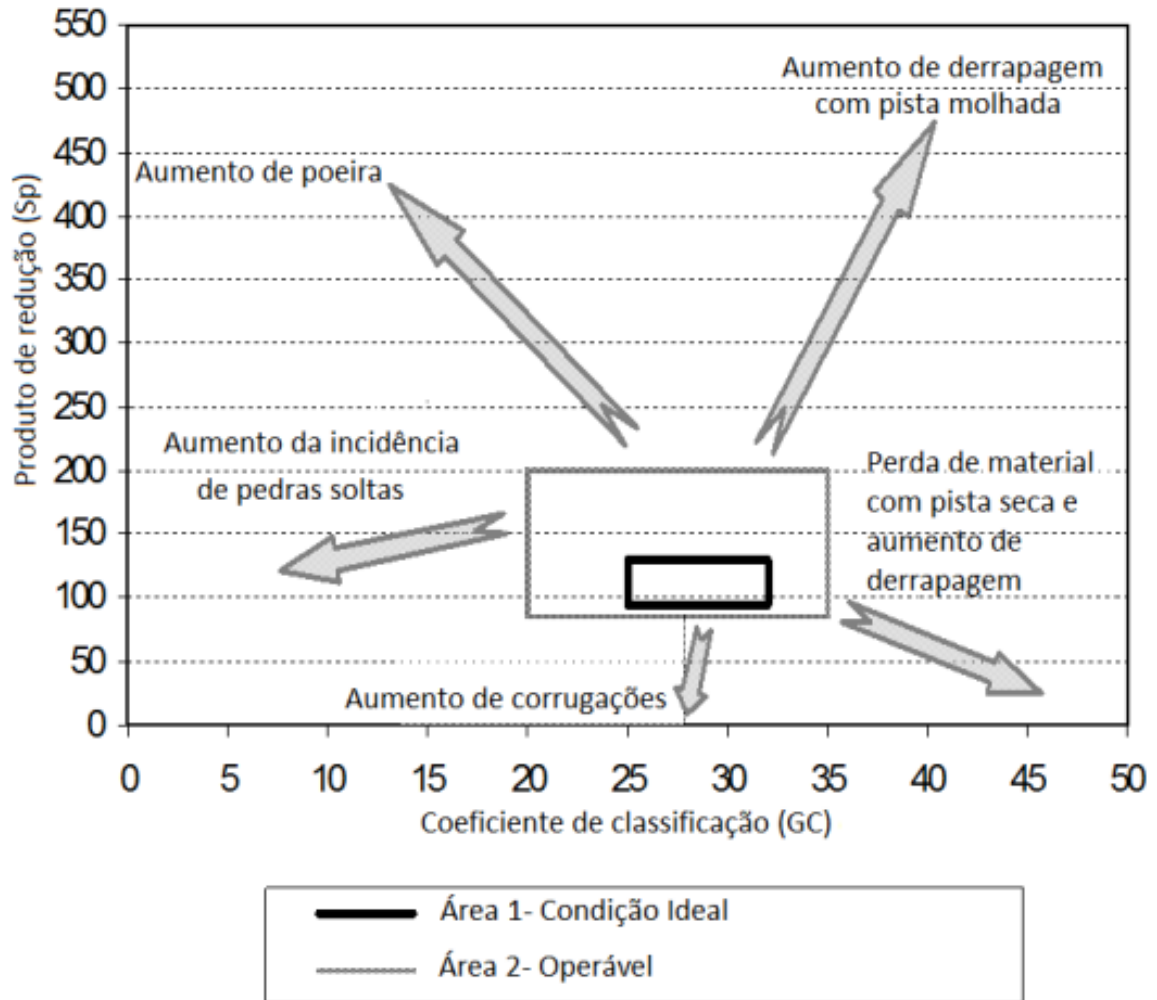
Para obter uma boa capacidade funcional do revestimento é necessário possibilitar que os equipamentos de transporte sejam capazes de viajar no limite da velocidade permitida na via ou trecho. Estas velocidades devem ser desempenhadas com a garantia de que o revestimento irá conferir segurança (THOMPSON; VISSER, 2003).

Visser (2015) retrata que geralmente a camada de revestimento é feita com uma mistura de materiais. O objetivo de misturar os materiais é o de conferir qualidades comuns aos produtos misturados, gerando uma sinergia com qualidades.

Cada uma das características procuradas, isto é, aderência, baixa emissão de poeira, boa agregação de materiais, baixo efeito de derrapagem por material solto em ambiente seco, entre outras, podem ser observadas a partir da Figura 21.

Ao analisar a Figura, é possível identificar que a qualidade do material para o revestimento deve cair dentro do quadrado cinza para ter condições operacionais. Porém é preferível que a qualidade do material fique dentro do quadrado de cor preta (THOMPSON & VISSER, 2014).

Figura 21: Relação qualitativa do revestimento.



Fonte: Retirado de Pellissari, (2019).

O *design* funcional está relacionado ao fornecimento de um material de uso fácil de usar. Uma camada de desgaste ideal para a construção de estradas de transporte de minas deve atender aos seguintes requisitos (VISSER, 2015):

- A capacidade de fornecer um passeio seguro e amigável ao veículo sem a necessidade de manutenção excessiva;
- Carga de tráfego adequada em condições úmidas e secas;
- A capacidade de derramar água sem erosão excessiva;
- Resistência à ação abrasiva do trânsito;
- Livre de poeira excessiva em tempo seco;
- Livre de escorregamento excessivo em tempo úmido;
- Baixo custo e facilidade de manutenção.

Conforme Visser (2015), ao examinar quais propriedades do material da camada de desgaste levam a defeitos, foi desenvolvida uma especificação para a seleção de materiais da camada de desgaste, conforme mostrado na Figura 21. As diretrizes são baseadas em uma avaliação do produto de contração do material da camada de desgaste Equação 11 (S_p) e coeficiente de classificação Equação 12 (G_c), definido como:

$$S_p = LS \times P_{425} \quad (11)$$

$$G_c = \frac{(P_{265} - P_2) \times P_{475}}{100} \quad (12)$$

Onde

LS = retração linear da barra;

P₄₂₅ = porcentagem da amostra de camada de desgaste passando na peneira de 0,425 mm;

P₂₆₅ = porcentagem da amostra de curso de desgaste passando na peneira de 26,5 mm;

P₂ = porcentagem da amostra de desgaste passando na peneira de 2 mm;

P₄₇₅ = porcentagem da amostra de desgaste passando na peneira de 4,75 mm.

2.4 Manutenção de estradas

De acordo com Fonseca (2009), o elevado custo na aquisição e manutenção de caminhões fora de estrada torna as pistas com boas condições um elemento muito importante para a segurança e eficiência dos equipamentos, pois as boas condições das pistas podem diminuir os gastos com manutenção e reposição de peças e ativos.

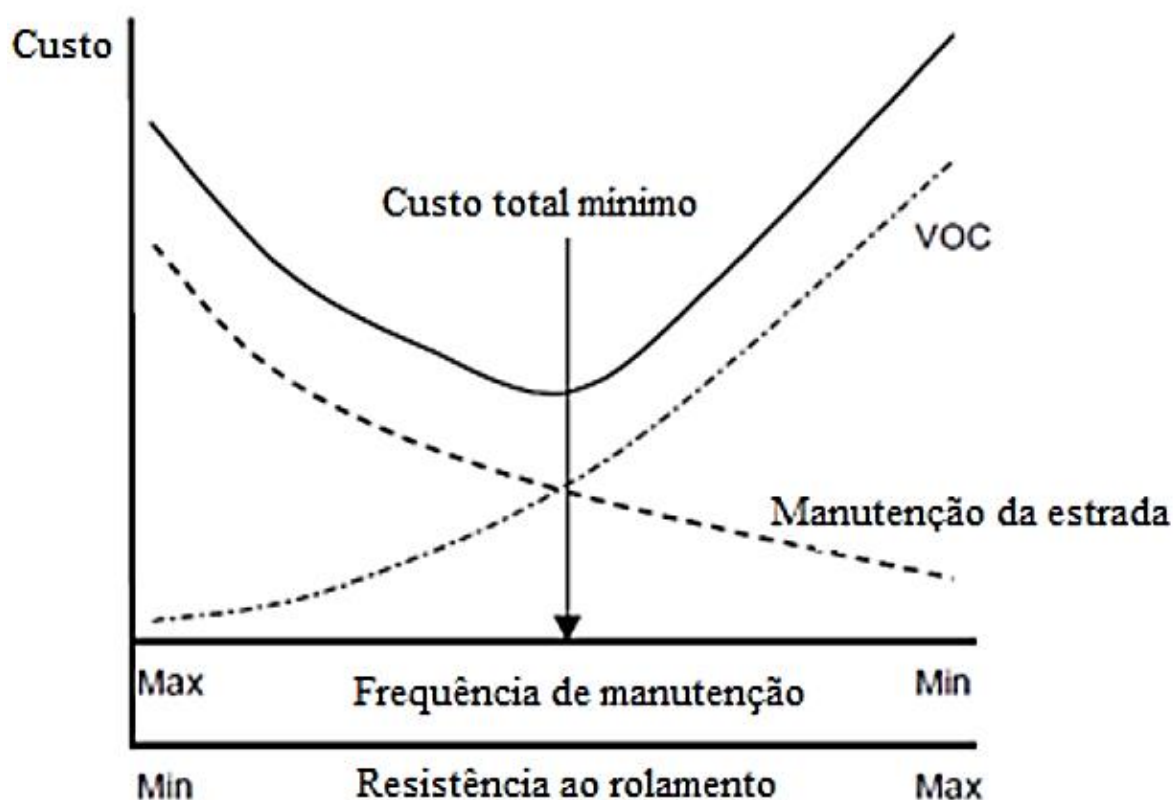
Todos os tipos de estrada necessitam de restauração e infraestrutura, como resultado do desgaste do uso ou do clima. As estradas de transporte não são diferentes. Normalmente, uma motoniveladora é usada e começa em uma extremidade da rede e completa a rede sem conhecimento dos volumes de tráfego ou uso. Inicialmente foi proposto um sistema de manutenção programada de motoniveladoras, onde cada estrada tinha uma frequência de manutenção dependendo do tipo de camada de desgaste, clima e tráfego. As operações em uma mina são geralmente altamente dinâmicas com desvios regulares do cronograma de produção planejado devido à indisponibilidade da carregadeira ou outros motivos. Isso significa que um regime de manutenção planejada não é o mais eficaz (VISSER, 2015).

Vias de acesso devem seguir boas práticas de projeto e construção, porém necessitam de intervenções recorrentes para a manutenção das suas capacidades funcionais. A falta da manutenção de vias de acesso pode incorrer em danos devido ao uso intensivo, podendo gerar um aumento nos tempos de ciclo de transporte dos equipamentos, aumento de custo operacional, como diesel e pneus, e aumento de custos de manutenção (THOMPSON; VISSER, 2014).

A manutenção de estradas é fundamental para conservar a superfície de rolamento razoavelmente isenta de irregularidades, além evitar a perda excessiva de material solto. A manutenção das vias tem papel importante na preservação da declividade transversal do leito da estrada assegurando o escoamento superficial das águas. É constituída por um conjunto de atividades que são executadas para minimizar os defeitos e, conseqüentemente, reduzir os custos operacionais dos caminhões, assim como para prolongar a vida útil das estradas (MONTEIRO, 2021).

Conforme Thompson & Visser (2003, *apud* Pellissari, 2019) a frequência de manutenção pode ser determinada de acordo com os custos, equipamentos disponíveis e o tráfego ao qual a via é exposta. O uso apropriado de uma estratégia de gerenciamento de manutenção tem o potencial de gerar economias significativas, sendo que toda a estratégia de manutenção deve ser baseada em um custo total mínimo onde converge os gastos de transporte com os gastos de manutenção da via, conforme a Figura 22.

Figura 22: Gráfico de custo ótimo.



Fonte: Thompson & Visser (2003).

A manutenção de estradas de mineração pode ser dividida por categorias e por atividades. A manutenção de rotina tem como atividades principais a identificação de corrugações, a drenagem e manutenção de bordas de estradas, o nivelamento raso e a aspersão de água. Para a correção das corrugações devem ser feitos os preenchimentos de buracos e pequenas depressões identificadas na pista, uma vez que tais iniciativas reduzem a erosão e melhoram a drenagem superficial. A drenagem e manutenção de bordas de estradas ajudam a reduzir a erosão e a perda de material das drenagens, bem como melhoram a superfície de drenagem. Já o nivelamento raso serve para redistribuir o material da superfície e ajudara preencher pequena depressões. Por fim, a aspersão de água ajuda a mitigar a suspensão de poeira no ar. A atividade de aspersão de água minimiza situações de risco e a redução de produtividade por baixa visibilidade (THOMPSON; VISSER, 2014).

De acordo com Pellissari (2019), a frequência de manutenção de vias pode ser classificada em reativas, programadas, segundo um sistema de manutenção e manutenção em tempo real. A manutenção reativa geralmente é realizada em um determinado trecho da estrada quando já é tarde demais. Este tipo de intervenção usualmente é realizada após

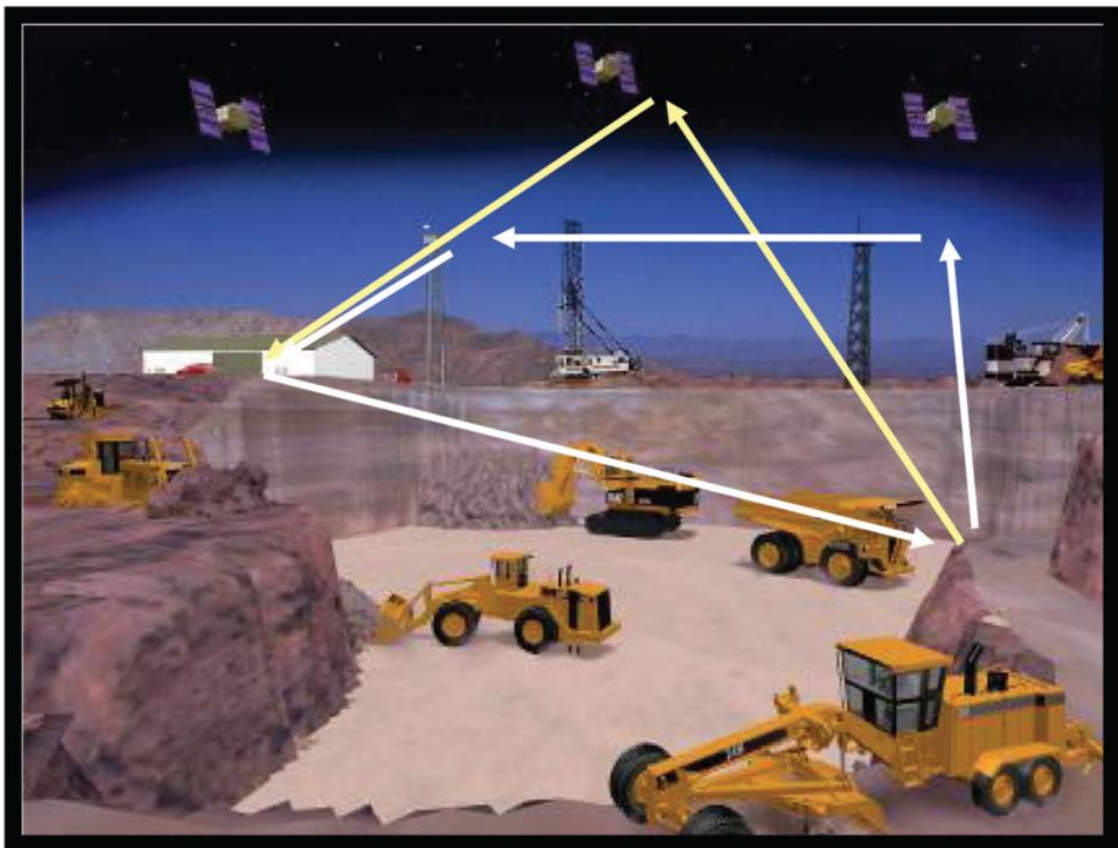
uma inspeção de campo e de acordo com a disponibilidade de equipamentos (THOMPSON & VISSER, 2014).

As manutenções programadas ocorrem de acordo com programação fixa, independente da funcionalidade da estrada. A manutenção realizada a partir de um sistema de manutenção é a manutenção gerencial, sendo que a rede de estradas é analisada conforme a deterioração de segmentos, volume de tráfego e demais elementos, visando à redução do custo total do uso da estrada (PELLISSARI, 2019).

Assim, Thompson e Visser (2003), a manutenção em tempo real consiste na análise de informações do despacho, telemetria embarcada nos equipamentos e análise online das informações para definir quais os trechos necessitam de intervenção e quais podem ser postergados.

O monitoramento em tempo real da resposta real do veículo às condições da estrada supera essas limitações (Thompson et al., 2004; Hugo et al., 2007). Isso é mostrado esquematicamente na Figura 23.

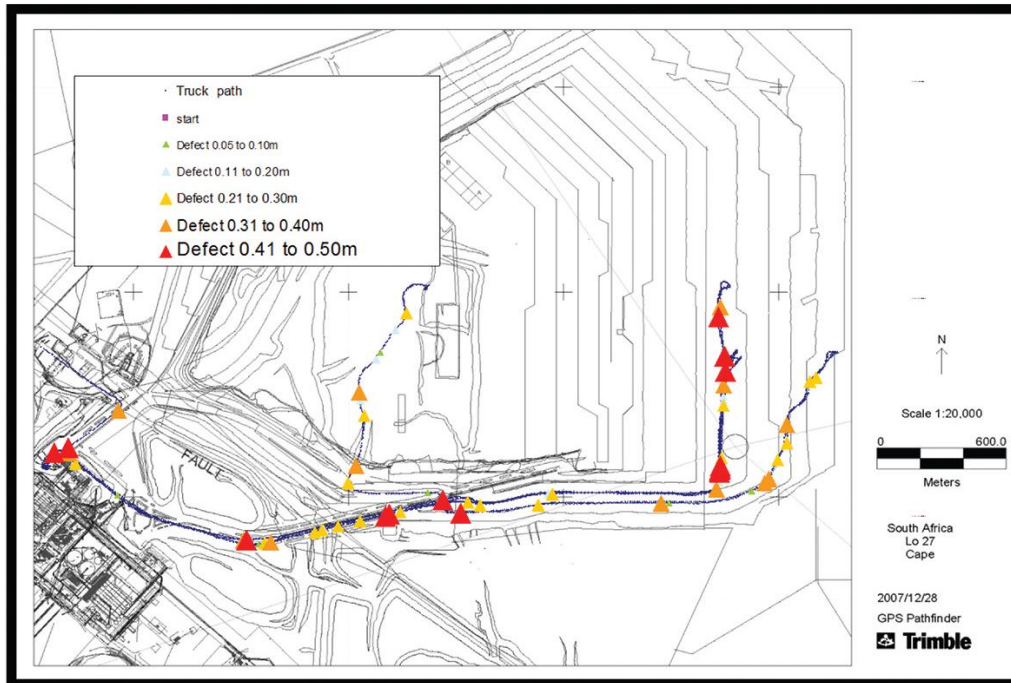
Figura 23: Desenvolvimento e integração do sistema de manutenção de estradas da mina em tempo real com os sistemas existentes de comunicação, localização e monitoramento de caminhões em toda a mina.



Fonte: Retirado de Thompson et al., (2003).

As informações sobre as condições que um caminhão experimenta são retransmitidas para despacho, onde o tipo de resultado mostrado na Figura 24 é fornecido.

Figura 24: Mapa de densidade de defeitos rodoviários para testes de campo na Mina Grootegeluk. Os símbolos representam a magnitude do defeito (profundidade ou altura)



Fonte: Marais et al., (2008).

Fica imediatamente claro quais trechos da rede rodoviária de transporte estão sendo usados e onde as condições mais severas são encontradas, e estes devem ser direcionados para manutenção. Se os defeitos forem tais que uma motoniveladora seja capaz de corrigir a situação, isso seria usado, caso contrário, uma carga de material adequado ou outras técnicas são aplicadas.

2.5 Gerenciamento de manutenção de estradas de transporte

Os usuários de estradas e as agências que mantêm as estradas normalmente são independentes. Torna-se então apropriado investigar o possível uso de veículos operacionais de minas para fins de gerenciamento de manutenção de estradas (THOMPSON *et al.*, 2003). Isso é ainda mais viável de avaliar, porque está cada vez mais comum a instalação de equipamentos de comunicação e posicionamento em caminhões

de transporte, para comunicar dados de desempenho e localizações de caminhões para um despacho de manutenção de forma contínua (HUGO, 2008).

De acordo com Hugo (2008), o uso de caminhões operacionais também apresenta vantagens como: esses veículos operam em seu ambiente de projeto; em segundo lugar esses ativos podem capturar dados de condição de vias durante a operação. Esta última é uma grande vantagem para avaliação frequente dos acessos.

Em comparação com as técnicas de gerenciamento de manutenção de estradas de transporte existentes, as medições de resposta do caminhão têm o potencial para uma avaliação completa, mas menos trabalhosa. Cada trecho da estrada sobre o qual o caminhão passa pode ser detectado e avaliado. A inspeção visual frequente de longos trechos de estrada não é mais necessária, pois a resposta do caminhão pode ser medida e processada de forma contínua e automática.

A qualidade da avaliação dependerá principalmente da eficiência das técnicas de análise utilizadas. A objetividade inerente das medições de resposta do caminhão é outra vantagem, pois a maioria das técnicas atuais são detecção através de inspeção visual. Mesmo os sistemas de gestão de manutenção são derivados de avaliações subjetivas (HUGO, 2008).

Por fim, as medições de resposta do caminhão, ao contrário dos sistemas de gerenciamento de manutenção, têm o potencial de não apenas identificar defeitos localizados, mas também para registrar a localização exata desses defeitos rodoviários por meio do sistema de posicionamento global (GPS) do ativo (HUGO, 2008).

Conforme Hugo (2008), a capacidade de identificar defeitos localizados em estrada de transporte é desejável para minimizar a operação e manutenção do veículo, ou seja, reduzindo assim os custos operacionais. Além disso, a capacidade de classificar os defeitos em termos de tipo e tamanho é vantajosa, uma vez que os tipos e tamanhos de defeitos determinam a estratégia de manutenção adequada. Uma outra abordagem utilizada é produzir classificações objetivas do Índice Internacional de Rugosidade (IRI) medindo o movimento do suporte de suspensão do caminhão de transporte.

2.5.1 Metodologia de reconstrução de estradas

Hugo (2008) aponta que a combinação de estradas diferentes produz respostas complexas ponderadas pelo veículo. O uso da resposta do veículo para identificar a entrada na estrada requer, portanto, diferenciação entre a resposta causada pela entrada

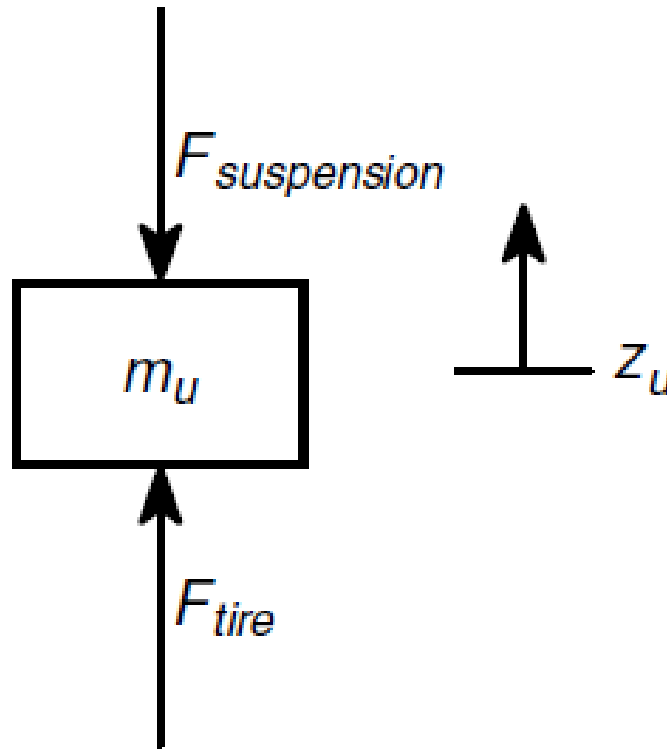
da estrada e a resposta induzida por outras fontes. Isso parece ser um objetivo razoável, uma vez que as entradas das estradas apresentam diferentes frequências gamas. No entanto, os locais de medição podem ser escolhidos para minimizar a influência de pontos indesejáveis.

Como um caminhão de transporte típico possui suspensões hidropneumáticas que exibem mola e amortecimento que apresentam características não lineares, medindo em qualquer lugar na massa suspensa exigiria a inversão de um sistema não linear para calcular com precisão a entrada da estrada a partir da resposta medida. Para evitar a inversão do sistema não linear, a entrada da estrada poderia, em princípio, ser reconstruída alterando a elevação da estrada fornecida para o modelo de simulação, até que a resposta simulada corresponda à resposta medida. Assim, a caracterização completa do conjunto do veículo seria necessária.

Por estas razões Hugo (2008) implementou um modelo simples que também favorece o cálculo a bordo em tempo real da entrada da estrada, permitindo assim a localização de defeitos na estrada, usando o GPS *on-board*. Hugo (2008) destaca também que o modelo deve ser o mais simplificado possível para ser implementado em qualquer modelo de caminhão. Objetivando atender essas demandas, foi formulado um modelo de uma roda dianteira e suspensão típica de caminhão de transporte.

A Figura 25 demonstra o diagrama de corpo livre rígido de uma massa dianteira independente não suspensa.

Figura 25: Equilíbrio dinâmico de uma massa não suspensa de frente independente mu do caminhão de transporte.



Fonte: Adaptado e retirado de Hugo, (2008).

Se a aceleração da massa não suspensa \ddot{z}_u e a força que atua entre as molas e massas não suspensas $F_{suspensão}$ são medidas, a força empregada na estrada F_{tiro} pode ser calculada através do simples cálculo algébrico de acordo com a Equação 11:

$$F_{tiro} = m_a \ddot{z}_a F_{suspensão} \quad (13)$$

O modelo demonstrado na Figura 23 trata o suporte de força de suspensão como uma variável conhecida. Portanto, essa força não é modelada como uma função não linear de suspensão relativa ao deslocamento e velocidade do suporte, nem a invenção de um sistema não linear necessário. Mais importante ainda é que a caracterização do veículo completo torna-se desnecessária.

Assumindo que a força de suspensão é uma variável mensurável, uma variável mensurável para calcular a entrada seria impor o equilíbrio dinâmico na massa não suspensa e alterar iterativamente a entrada da estrada até a resposta de aceleração de massa não suspensa simulada \ddot{z}_u corresponde à resposta medida. Esta abordagem pode acomodar modelos de pneus complexos, uma vez que não é necessária nenhuma inversão.

A abordagem adotada por Hugo (2008), no entanto, calcula a força do pneu F_{tire} diretamente pela Equação 11. Esta força é então usada em um conjunto com o deslocamento de massa não suspenso e um modelo de pneu inverso para calcular a entrada da estrada. A vantagem dessa abordagem é que nem a vibração da estrutura e nem vibrações de outras fontes a bordo influenciam significativamente os sinais medidos na frequência (faixa abaixo de 10 Hz). Isso será comprovado por meio de análises dos dados medidos no caminhão sob consideração.

As não uniformidades pneu/roda criam forças que não podem ser distinguidas da força do pneu F_{tire} . No entanto, Cebon (1999 *apud* Hugo, 2008) indica que as forças causadas por não uniformidades dos pneus são geralmente significativas em estradas lisas, onde podem ser comparadas em magnitude às forças causadas pela excitação da estrada. Nesse caso a análise foi realizada em estradas de cascalho para identificar grandes defeitos, os quais podem ser considerados negligenciáveis. Todas as outras forças significativas que atuam na massa não suspensa, como aquelas causadas pelo movimento de inclinação e rotação da massa suspensa, são transferidas através da suspensão. Estes podem, portanto, ser medidos separadamente do força do pneu.

Este método corresponde, em princípio, ao método de eixos extensos descrito por Cebon (1999 *apud* Hugo, 2008). Este último usa extensômetros para medir os momentos de flexão ou as forças de cisalhamento de um eixo entre os suportes das molas e as rodas, e acelerômetros para medir a aceleração do eixo. O equilíbrio dinâmico é então aplicado nos componentes externos dos extensômetros para calcular a força do pneu. A principal diferença entre o este método e o descrito por Cebon é a forma como são medidas as forças entre as massas não suspensas e suspensas.

2.5.2 Caracterização do veículo e medições da resposta dinâmica

Medições práticas foram feitas em um komatsu 730E Haulpack (Figura 26). Este veículo tem um gvw (peso bruto do veículo) de 324 toneladas, uma capacidade de carga de 186 toneladas, uma potência nominal do motor de 1492 kw e um diâmetro de pneu inflado de cerca de 3,5 m. o veículo é movido nas rodas traseiras por dois motores elétricos localizados em uma carcaça cilíndrica oca. Dois suportes hidropneumáticos suspendem a massa suspensa do veículo na parte traseira. Parte da suspensão traseira é um braço de arrasto que gira na massa suspensa. Na frente do veículo, a massa é suspensa por dois suportes de suspensão hidropneumáticos independentes. As massas não

suspensas dianteiras (esquerda e direita) podem, portanto, mover-se independentemente. Embora vários modelos de caminhões de transporte diferem significativamente entre si, este caminhão pode ser considerado bastante típico e as técnicas aqui apresentadas podem ser facilmente generalizadas para caminhões de transporte desta natureza.

Figura 26: O Komatsu 730E Haulpack usado no estudo.



Fonte: Hugo et al., (2008).

De acordo com Hugo *et al.*, (2008) o caminhão de transporte da Figura 24 foi caracterizado em termos de suas propriedades de resposta dinâmica. Isso compreendeu a caracterização da rigidez vertical dos pneus, bem como o amortecimento e a rigidez dos suportes da suspensão dianteira. Além disso, a resposta dinâmica de um veículo operacional foi medida em uma seção de teste que continha defeitos artificiais especialmente construídos.

2.5.2.1 Caracterização do veículo

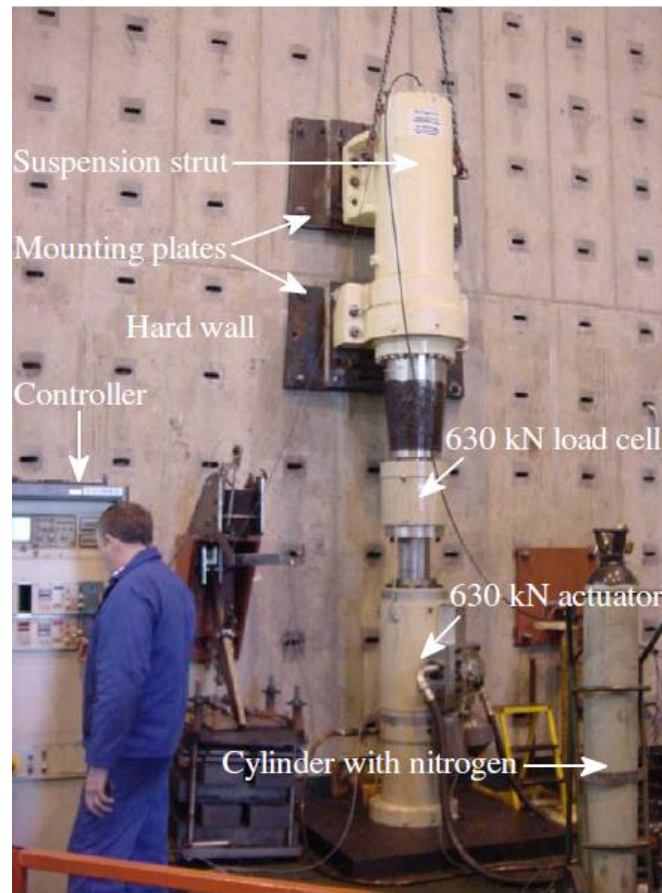
Os pneus do caminhão foram caracterizados *in situ* em uma báscula a céu aberto, devido ao seu tamanho. O caminhão foi carregado com diferentes quantidades de carvão, enquanto registrava o peso em cada roda. Ao mesmo tempo foi medido o deslocamento

vertical entre o solo e um ponto no aro de cada roda, utilizando-se o raio do pneu sem carga como zero. Para obter mais um ponto de dados, a deflexão do pneu também foi medida sob o próprio peso do pneu. Este procedimento foi repetido para duas diferentes pressões de enchimento dos pneus (HUGO, 2008).

No entanto, verificou-se que pequenas variações de pressão e o uso de pneus de diferentes fabricantes, não causaram variação significativa nas características de rigidez observadas. Os dados foram, portanto, considerados adequados para calcular uma característica de rigidez vertical do pneu para atender aos requisitos de modelagem atuais. Uma relação razoavelmente linear foi evidente ao longo da faixa de medição e um valor efetivo para a rigidez do pneu foi calculado (HUGO, 2008).

Hugo, (2008) afirma que os suportes de suspensão hidropneumáticos contêm gás nitrogênio e óleo. A compressão do gás nitrogênio causa uma força de mola, enquanto a resistência do fluxo de óleo através das portas de amortecimento causa uma força de amortecimento. Tal escora de suspensão dianteira foi caracterizada enquanto apoiada verticalmente como mostrado na Figura 27. Um atuador de 630 kN foi usado para excitá-lo em uma faixa de frequências. Durante a excitação, a força total exercida pela escora foi medida pela célula de carga do atuador, o deslocamento do suporte foi medido pelo transdutor de deslocamento variável linear do atuador, e a pressão do gás nitrogênio dentro do suporte foi medida por um transdutor de pressão padrão.

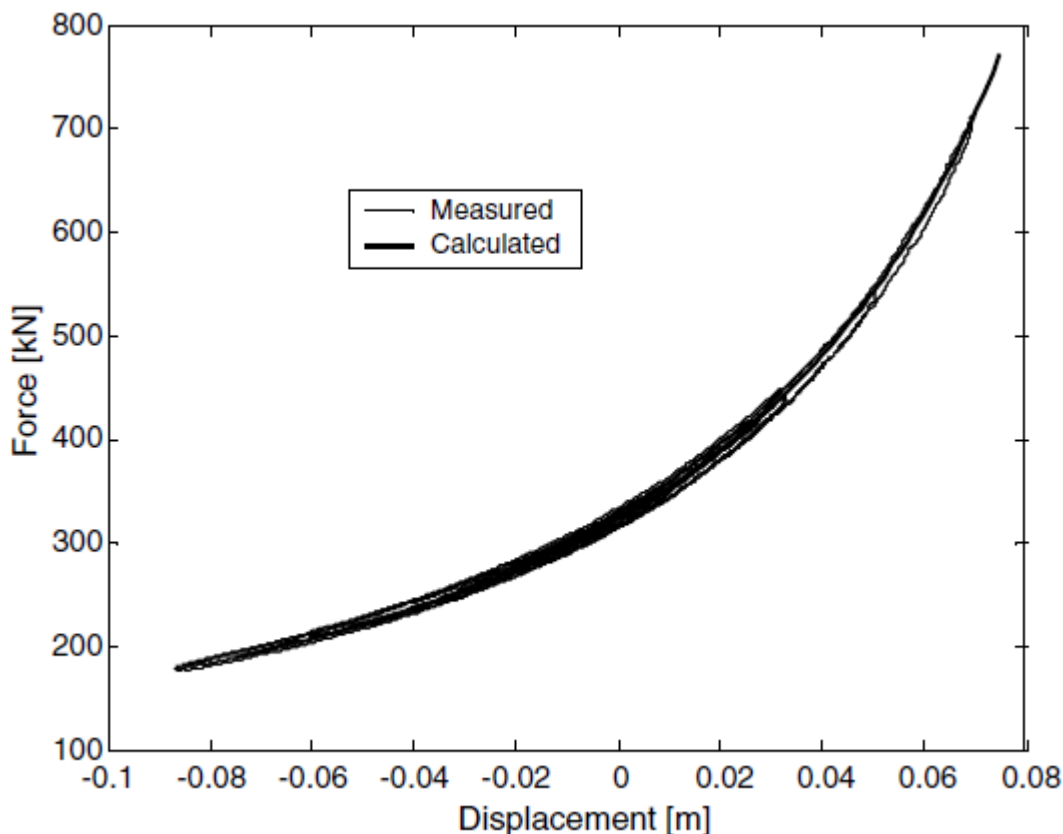
Figura 27: Configuração de teste para a caracterização do amortecedor Komatsu 730E Haulpack.



Fonte: Hugo *et al.*, (2008).

A pressão do gás medida e a área efetiva dentro da escora sobre a qual o gás agia foram usadas para calcular a força da mola exercida pela escora. Posteriormente, a lei dos gases ideais foi utilizada para caracterizar a rigidez da biela em termos de força da mola versus deslocamento. Essa característica também foi calculada a partir dos dados de resposta dinâmica (pressão do gás nitrogênio e deslocamento do amortecedor) medidos em um veículo operacional. Verificou-se que a compressão adiabática se assemelhava bastante ao movimento das escoras durante a operação do veículo. A Figura 28 representa a característica adiabática calculada sobreposta aos dados medidos. Els (1993, *apud* Hugo, 2008) apresenta um método para modelar a natureza dos dados medidos devido aos efeitos de transferência de calor. Para os propósitos deste trabalho, entretanto, a característica apresentada na Figura 28 foi considerada suficiente.

Figura 28: Características medidas e calculadas da rigidez do amortecedor de suspensão.



Fonte: Hugo *et al.*, (2008).

Uma vez que a característica de rigidez pode ser calculada a partir dos dados de resposta do veículo operacional, o objetivo principal das medições de laboratório foi caracterizar a biela em termos de suas propriedades de amortecimento, o que não poderia ser feito a partir das quantidades mensuráveis no veículo operacional. A excitação do suporte com sinais de deslocamento dente de serra em uma faixa de frequências criou diferentes ciclos de compressão e extensão de velocidade constante. Durante a excitação, a força de amortecimento exercida pela escora foi calculada como a diferença entre a força total e a força da mola. A força resultante, portanto, inclui um componente de atrito. A velocidade relativa da escora durante a compressão e extensão em dois instantes durante a excitação em cada frequência, foram então plotadas contra as forças de amortecimento correspondentes para obter a característica de amortecimento da escora em uma faixa de velocidades.

Como Hugo (2008) cita, a taxa de fluxo de óleo hidráulico para o atuador limitou a velocidade absoluta da haste no laboratório a 0,06 m/s. Como a velocidade relativa de uma escora em um veículo operacional frequentemente excede esse valor quando o

veículo encontra defeitos na estrada, foi necessário extrapolar a característica medida. O amortecimento do fluido neste suporte é causado por portas com geometrias simples. Como resultado, foi possível descrever a queda de pressão sobre essas portas em termos da velocidade do fluido através das portas. Ao expandir as relações teóricas, finalmente foi possível descrever a força de amortecimento exercida pela biela em termos de velocidade relativa da biela como mostra a Equação 12:

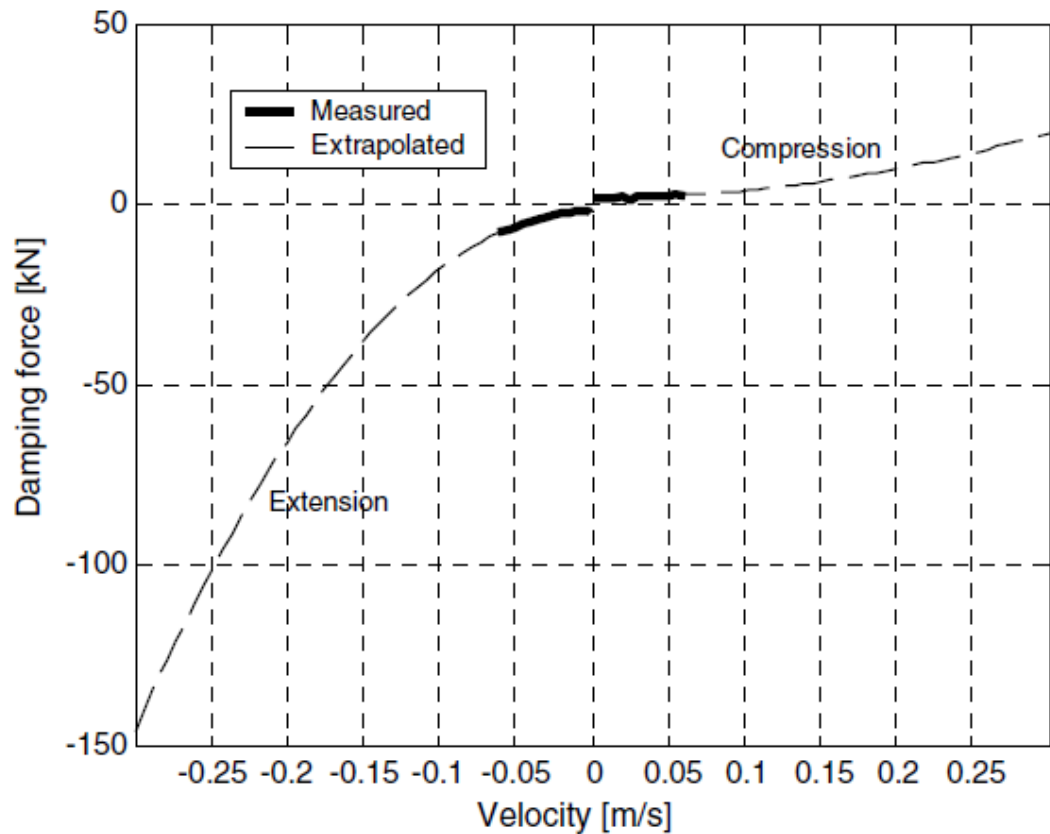
$$F_{suspensão} = C_{suspensão} V_{suspensão}^2 \quad (14)$$

Onde:

- $F_{suspensão}$ é a força de suspensão;
- $V_{suspensão}$ é a velocidade do amortecedor;
- $C_{suspensão}$ é a constante que consiste em parâmetros conhecidos.

A Figura 29 mostra as características de amortecimento medidas e calculadas. A Equação (14) foi usado para produzir a característica calculada com diferentes valores para $C_{suspensão}$ (constante de suspensão) em compressão e extensão. Um maior amortecimento na extensão em comparação com a compressão é evidente, o que é consistente com o projeto do amortecedor em que algumas das aberturas são fechadas durante a extensão. Embora a relação entre a queda de pressão e a velocidade do fluido tenha sido significativamente simplificada assumindo um escoamento unidimensional sem atrito em estado estacionário incompressível, é evidente a partir desta figura que a Equação (14) assemelha-se bem aos dados medidos até 0,06 m/s. O restante da característica só pode ser verificado através de uma análise detalhada ou medição em toda a faixa de operação do suporte. Os resultados foram bastante insensíveis a pequenas mudanças nas propriedades de amortecimento. Esta característica foi, portanto, considerada adequada para os propósitos atuais.

Figura 29: Características medidas e extrapoladas da ação do amortecedor.



Fonte: Hugo *et al.*, (2008).

A força de atrito dinâmico que está presente quando o amortecedor está em movimento relativo é representada pelos deslocamentos da posição zero das curvas de compressão e extensão. Essa força pode mudar ligeiramente durante a operação, mas apenas por quantidades que são insignificantes na aplicação atual e, portanto, é modelado como parte da força de amortecimento simplesmente adicionando um valor de força constante às equações que descrevem o amortecimento do fluido durante a compressão e a extensão.

Segundo Hugo *et al.*, (2008), a magnitude da força de atrito estático presente quando o movimento relativo do amortecedor é zero não pode ser determinada em termos de movimento relativo do amortecedor, o que implica que defeitos de estrada muito pequenos ou baixos níveis de rugosidade não serão identificáveis ao usar esta abordagem para calcular a força do amortecedor de suspensão.

2.5.2.2 Medições de resposta dinâmica

Para investigar a metodologia apresentada anteriormente, as medições no veículo operacional foram focadas na frente do veículo. As medidas incluíram a aceleração vertical das massas não suspensas dianteiras independentes, a aceleração vertical da massa suspensa na frente (medida no topo dos amortecedores da suspensão), as pressões dos amortecedores da suspensão dianteira, o deslocamento relativo dos amortecedores dianteiros e o passo, velocidades de rolagem e guinada da massa suspensa (HUGO, 2008).

Medindo essas quantidades, no estudo de Hugo et al., (2008), o caminhão sem carga foi conduzido por uma seção de teste com defeitos construídos artificialmente, algumas vezes em diferentes velocidades. Os defeitos eram compostos por valas e lombadas variando em largura de 0,6 a 7,8 m e em altura (ou profundidade) de 0,1 a 0,35 m. A posição do veículo na estrada foi registrada por um GPS, e as localizações dos defeitos foram estabelecidas no mesmo sistema de coordenadas antes das medições de resposta. Isso permitiu que as medições de resposta fossem sincronizadas com a entrada da estrada à medida que o caminhão atravessava a seção da estrada.

Com esses conjuntos de dados disponíveis, a modelagem e simulação matemática se tornaram possíveis. A modelagem serviu de base para a compreensão do problema, além de permitir verificar as características do veículo e avaliar a precisão da medição da força do amortecedor (HUGO, 2008).

2.6 Relação custo-benefício nas operações utilizando manutenção de estradas

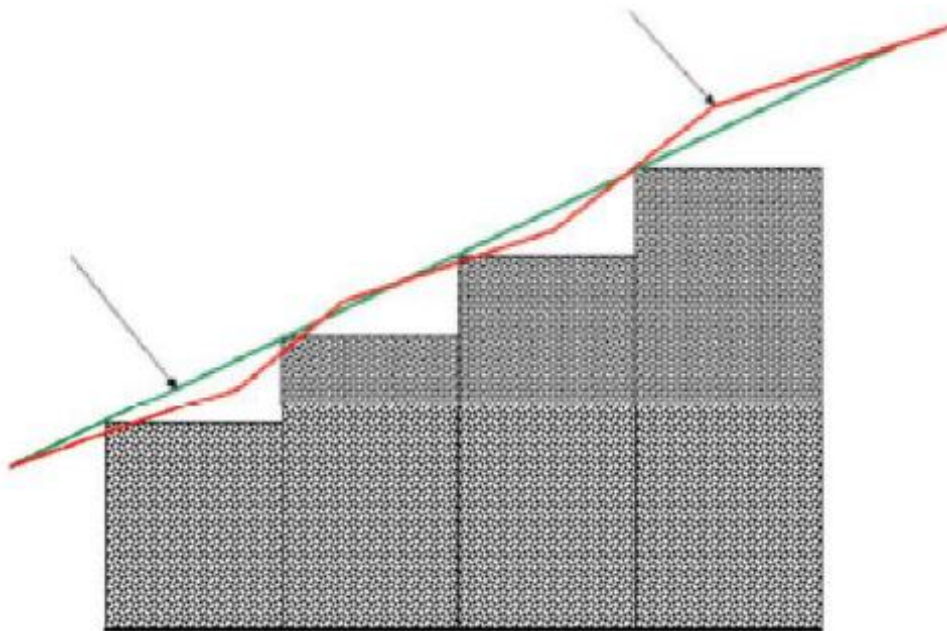
Visser (2015) aponta que o layout da rede rodoviária de transporte deve ser adaptado aos requisitos de mineração. Isso muitas vezes leva a um conflito de requisitos, pois o ideal layout em termos de gradientes verticais e curvatura horizontal nem sempre é alcançável. O princípio orientador deve ser que a estrada de transporte permita que os caminhões de transporte operem com a máxima eficiência. As curvas horizontais devem ter o maior raio possível para permitir que os caminhões trafeguem na velocidade máxima sem causar danos indevidos à estrada.

Uma limitação é o raio da curva em ziguezagues. Invariavelmente, não há espaço suficiente para permitir curvas de alto raio, e o resultado são danos graves na estrada, pois as rodas do caminhão se arrastam ao redor da curva em vez de girar, deixando material solto na superfície, o que afeta a tração e aumenta a resistência ao rolamento. Uma grande

complicação encontrada é que os ziguezagues têm um raio muito pequeno quando uma frota de caminhões maior é introduzida e não há espaço para aumentar o raio. O resultado é que o caminhão precisa fazer uma manobra de três pontos para negociar o ziguezague. Isso é extremamente perigoso e afeta a produtividade. No momento do planejamento do layout da mina, todos os ziguezagues precisam ser de tal forma que um caminhão maior, que tenha um raio de giro maior, possa ser acomodado (HUSTRULID & KUCHTA, 2013).

Os caminhões se adaptam melhor quando uma inclinação tem um gradiente constante. A Figura 30 mostra (linha vermelha) um gradiente típico de uma fissura entre as várias bancadas. A cada quebra de inclinação, que pode variar de 8% a 13%, o caminhão precisa mudar de marcha e, sob carga, isso sobrecarrega muito o trem de força. Cada vez que o conversor de torque é acionado, as rodas giram momentaneamente e causam danos à superfície da estrada (VISSER, 2015).

Figura 30: Gradiente incorreto (não uniforme - vermelho) e correto (uniforme - verde).



Fonte: Visser, (2015).

Como todos os caminhões mudarão de marcha na mesma área, há um problema de manutenção permanente que não pode ser resolvido.

A solução é garantir que o gradiente seja contínuo e uniforme, como mostra a linha verde na Figura 30. Isso pode ser facilmente alcançado por sobreperfuração na parte externa da bancada, de modo que o gradiente correto possa ser construído com facilidade.

Como exemplo, considerando um caminhão basculante traseiro da classe 380 t, subindo a rampa onde a inclinação da estrada varia entre 8% e 13%, com resistência ao rolamento de 3%.

Segundo Visser (2018), este projeto permitirá que uma frota de sete caminhões transporte 340 t por caminhão-hora. No entanto, removendo as quebras de *grade* (usando uma inclinação constante de 10,3% de baixo para cima), podem ser transportadas 470 toneladas por caminhão/hora – um aumento de 38% ou 500.000 t/a. Se uma meta de escavação anual de 10 Mt fosse definida, usando um projeto de estrada melhorado e uma diretriz de construção, a meta poderia ser alcançada com cinco em vez de sete caminhões

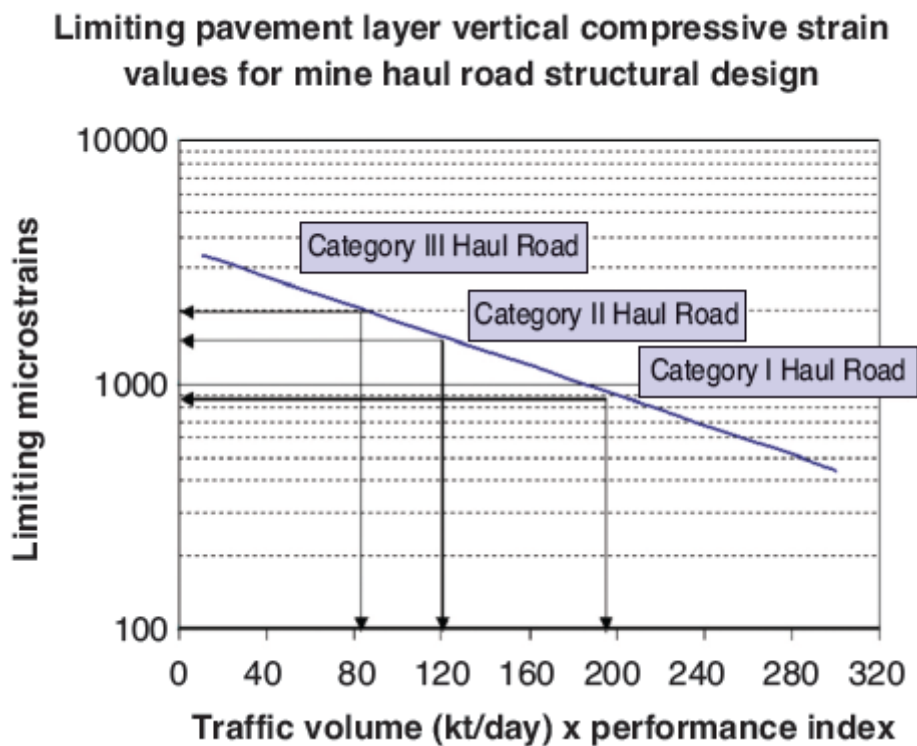
Na fase de planejamento da mina, muitas vezes é adotada uma abordagem de custo inclui a largura da estrada. Não são levadas em consideração as estruturas geotécnicas, como a estabilidade dos taludes das cavas. Dessa forma, problemas sérios foram encontrados quando uma queda de rochas ou deslizamento resultou no fechamento de uma estrada ou no estreitamento da estrada de modo que as operações de transporte sejam prejudicadas.

A maioria das operações a céu aberto tem pelo menos duas saídas de estrada de mina de transporte da cava devido a considerações de segurança, e um fechamento de estrada pode ter sérias implicações. Onde apenas metade da largura da estrada está aberta ao tráfego, há conflito potencial e o risco de acidente aumenta, e a produtividade é afetada, pois os caminhões têm que esperar no estreitamento. A largura da estrada também pode ser um fator quando um tipo de caminhão maior é introduzido. É mais seguro construir estradas mais largas do que mais estreitas para que as complicações potenciais sejam minimizadas (VISSER, 2015).

Em uma operação de carvão na África do Sul, uma economia de cerca de um milhão de litros de diesel foram produzidos no ano após a melhoria dos gradientes não uniformes e dos raios das curvas, sem alteração no volume anual de material transportado. Esta é uma economia direta e não inclui melhorias na vida útil do motor e do pneu. O deslocamento excessivo da transmissão no transporte carregado reduzirá a vida útil do motor, do trem de força e do motor da roda. Na viagem de retorno vazio, ocorrerá superaquecimento do retardo no gradiente não uniforme com desgaste mecânico concomitante. Esses aspectos demonstram as economias significativas que podem ocorrer ao otimizar a geometria da estrada de transporte (VISSER, 2015).

A importância de um trecho de estrada é designada por categoria de estrada, conforme mostrado na Tabela 3, e a resistência estrutural em termos de deformação de compressão vertical está relacionada à categoria de estrada e desempenho esperado. O tráfego diário (kt) é ajustado multiplicando-se pelo índice de desempenho, e a deformação vertical permitida é mostrada na Figura 31. Para um volume de tráfego ajustado maior que 240 kt, uma deformação vertical de compressão de 900 microstrain deve ser usada. A maioria das operações sul-africanas está na faixa mais baixa de volume de tráfego, mas muitas operações internacionais são consideravelmente mais altas.

Figura 31: Limitando a tensão vertical relacionada à importância e categoria da estrada.



Fonte: Thompson and Visser, (2002).

Tabela 3: Summary of haul road categories (Thompson and Visser, 2002).

Haul road category	Daily traffic volume ¹ (kt)	Required performance index ²	Description
Category I	>25	7-9	Permanent high-volume main roads from ramps to tip. Operating life at least 20 years.
Category II	8-24	5-6	Semi-permanent ramp roads, in- and ex-pit hauling roads on blasted rock on <i>in situ</i> , medium traffic volumes. Operating life under 10 years.
Category III	<7	>4	Transient in- and ex-pit roads, low traffic volumes. Operating life under 3 years.

¹ Traffic based on maximum dual rear wheel load of 2-axle 480 t GVM haul truck

² Based on acceptable structural performance of roads and maximum deflection under fully laden rear wheel, where 10=excellent performance, 1=unacceptably poor performance, following Thompson and Visser (1996)

Esses procedimentos de projeto foram desenvolvidos com base em observações de estradas de transporte existentes e no monitoramento dos desvios de profundidade. Após o desenvolvimento dos procedimentos de análise, pelo menos 10 estradas foram construídas seguindo o método de projeto mecanicista, e durante os verões extremamente úmidos de 1996 e 2000, foi relatado desempenho e carga de tráfego superiores em comparação com as estradas existentes anteriormente. Em um caso particular, a carga de tráfego otimizada da estrada significou que a implementação planejada do trolley-assist poderia ser ainda mais atrasada em virtude da redução da construção da estrada e do aumento da produtividade do caminhão (VISSER, 2015).

Visser (2015) ressalta que várias das estradas que foram construídas foram monitoradas e desvios profundos sob carregamento de caminhões de transporte foram feitos em duas minas. Este último procedimento foi repleto de problemas, pois em uma mina era difícil perfurar um buraco de 40 mm através da camada de rocha dura com muitos vazios. No entanto, nas demais minas foram obtidas medições que confirmaram a rigidez da camada de enrocamento, porém na faixa inferior dos valores previamente determinados. A sensibilidade ao estresse foi confirmada, o que significa que quanto maior a carga, mais rígida a estrutura do pavimento. Esta é uma informação valiosa quando uma frota de caminhões maior é introduzida.

Com base na pesquisa, várias estradas de transporte *greenfield* foram projetadas e construídas na África do Sul, bem como em Botsuana, Namíbia, Brasil, Chile e Austrália. Invariavelmente, o empreiteiro será da opinião de que é “uma estrada sólida”. Como apontado acima, a deflexão da superfície da estrada sob um caminhão de transporte é reduzida. Isso significa que a curvatura de deflexão é reduzida em extensão, e isso, por sua vez, tem como resultado que o pneu não precisa sair da curvatura, o que reduz o consumo de combustível.

Thompson e Visser (1996 *apud* Visser, 2015) demonstrou que o projeto baseado no procedimento mecanicista era 28,5% mais barato que o método antigo em uma licitação real para custos variáveis, e 17,4% mais barato nos custos totais (incluindo custos preliminares e gerais). Na mina de minério de ferro de Khomamani, no Cabo Setentrional, foi feita uma economia significativa na construção da estrada principal de transporte em comparação com o custo orçamentário. Essa economia foi aplicada para melhorar outras partes do sistema viário.

Este procedimento de projeto foi aplicado em várias minas para investigar se as estradas de transporte são capazes de suportar caminhões maiores do que os usados e, se

não, como as deficiências podem ser melhoradas. Isso permitiu que o planejamento de caminhões maiores prosseguisse, sem surpresas quando os caminhões chegassem. Os mesmos procedimentos também foram aplicados com sucesso no projeto de uma rota para uma *dragline* transitar de uma mina para outra. Sem a compreensão teórica, empreendimentos tão importantes não teriam sido possíveis.

Finalmente, o conceito de uma camada de rocha de despejo como uma camada estrutural forte (valores de rigidez foram derivados) forneceu uma solução para estradas de transporte subterrâneas. Os túneis subterrâneos têm uma parede irregular como resultado da técnica de perfuração e detonação, e quantidades significativas de água tendem a se acumular nos pontos baixos. Essa água faz com que o material fino seja bombeado pelas lajes de concreto sob a ação das cargas pesadas, levando a vazios nas camadas e falhas, rachaduras e esburacamento da camada de desgaste do concreto. O uso de rocha de despejo com finos mínimos fornece uma camada forte e resistente à água, e não ocorre bombeamento. As seções experimentais iniciais mostraram-se promissoras, e mais trabalhos estão sendo planejados (VISSER, 2015).

2.7 Variação de consumo de diesel

De acordo com Rodovalho *et al.*, (2016) em grandes minas a céu aberto, as operações de carga e transporte são comumente realizadas por caminhões (transporte) e escavadeiras (carga). Dentre as operações realizadas em uma mina a céu aberto, o transporte possui o maior custo operacional. Curry *et al.*, (204 *apud* Rodovalho *et al.*, 2016) apontam que ao longo dos últimos anos, esse método tem sido amplamente discutido devido ao aumento significativo de seus custos operacionais. Isso se justifica com base em insumos como óleo diesel e pneus. Conforme Bozorgebrahimi *et al.* (2003 *apud* Rodovalho, 2016), as operações de transporte correspondem a 46% dos custos da operação de mineração. Em adendo, o combustível ocupa o primeiro lugar na composição desses custos.

Dessa forma, as mineradoras buscam reduzir os custos operacionais por meio do controle do consumo desses insumos (RODOVALHO *et al.*, 2016).

Segundo Gomes *et al.*, (2015), quando são aplicadas técnicas que reduzem o consumo de insumos, a indústria da mineração pode se tornar mais econômica e sustentável. Então, de acordo com Rodovalho *et al.*, (2016) é essencial a avaliação das variáveis que influenciam o consumo de diesel, para garantir a competitividade na

indústria da mineração. No entanto, a mineração na indústria carece de uma metodologia capaz de selecionar e mensurar os aspectos operacionais que tem maior ou menor influência no consumo de combustível.

Chegar a esse objetivo representaria um método tangível de gerenciamento e controle dos custos operacionais dos caminhões de transporte. O controle efetivo do consumo de combustíveis fósseis também otimiza o desempenho ambiental das mineradoras, reduzindo suas emissões de gases de efeito estufa – GHG (MOTLOGELWA & MINNITT, 2013).

Conforme Rodvalho et al., (2016) em grandes mineradoras de ferro os custos de estéril e transporte de minério têm relação direta com o consumo de diesel. Pela crescente demanda de produção, é necessário o uso de caminhões fora de estrada com capacidades cada vez maiores, levando ao aumento do consumo de energia.

Shafiee e Topal (2012) confirmam que a estimativa, simulação de custos e análise de desempenho operacional podem ser feitas por meio de análise gráfica de tabelas e equações. Todos esses recursos destinam-se a identificar um padrão vinculado a uma configuração operacional específica. Esse padrão é usado como referência para estimar indicadores e apoiar decisões em condições operacionais parecidas. A fim de identificar e investigar os aspectos que afetam o consumo de combustível nas operações de transporte é necessário delimitar um período de um ano para a coleta dos dados.

Levesque et al., (2014) afirmam que o desenvolvimento desta metodologia de redução do consumo de diesel, não se limita a abordar os aspectos econômicos, mas também tem grande potencial para promover a sustentabilidade nas operações de minas. O caminho para reduzir as emissões de gases do efeito estufa e, portanto, reduzir o consumo de diesel inicia com o desenvolvimento de ferramentas de gestão capazes de identificar e abordar questões que influenciam fortemente o consumo (GOMES, 2015).

2.7.1 Fatores relacionados ao consumo de diesel

Para compreender o comportamento do consumo de combustível nas operações de transporte de minas, não se deve limitar aos parâmetros mecânicos (Australian Government, 2010). Entretanto, é necessário avaliar a influência do fator humano no comportamento dessa variável. A ação dos operadores é suportada pelo seu estilo de condução. Esse recurso difere sob condições de aceleração, frenagem, curvas, variações de velocidade e manobras. Conforme Shafiee e Topal (2012), existem outras condições

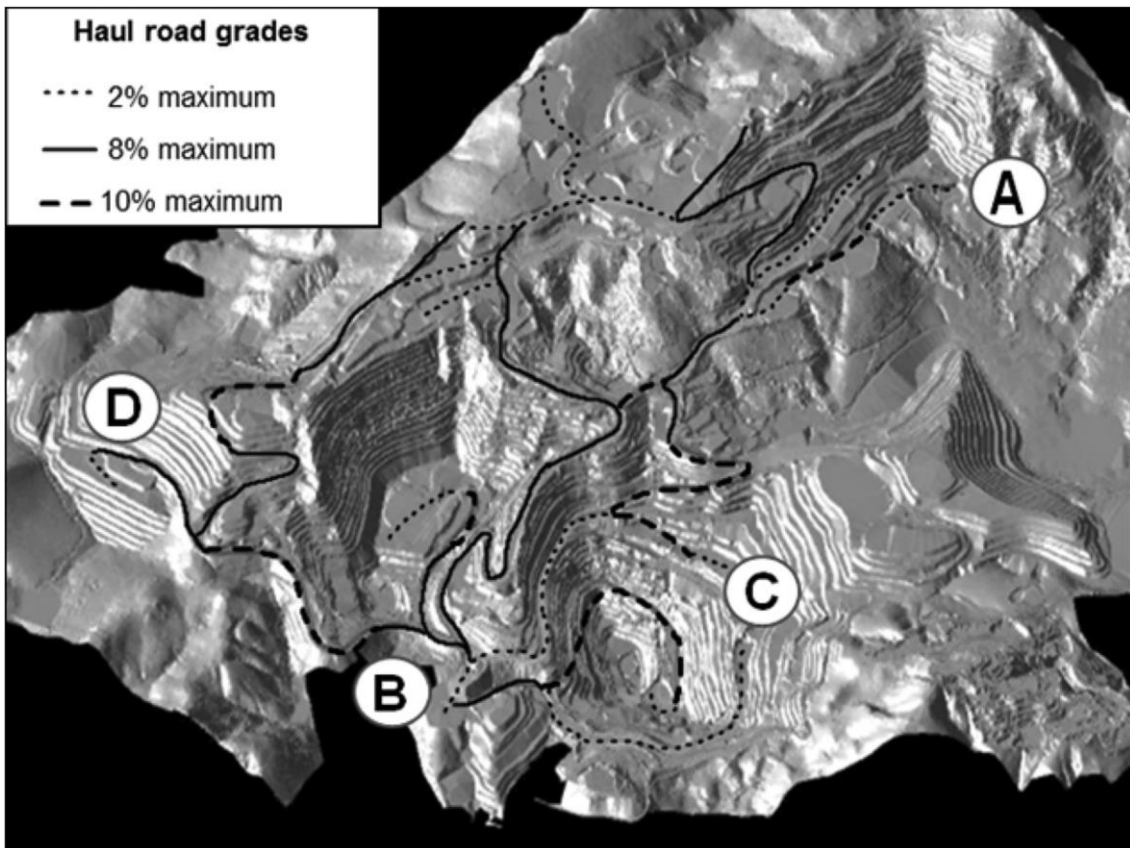
associadas que influenciam o desempenho do processo de produção, como condições climáticas e topográficas. Assim, fica claro que todos esses pontos são abordados em treinamento operacional específico para condução de caminhões de transporte. No entanto, as equipes de operação de minas compõem um grupo heterogêneo no que diz respeito à capacidade de executar cada uma das etapas do processo de forma mais segura, econômica e produtiva possível.

Conforme Rodovalho et al., (2016), a primeira etapa deste estudo busca estabelecer um método para mensurar a variabilidade do consumo de combustível entre as equipes considerando sua heterogeneidade quanto à experiência e capacidade de operação dos equipamentos. Essa condição existe dentro de cada equipe ou entre uma equipe e outra. Além disso, as equipes estão sujeitas a diversas circunstâncias operacionais, como condições climáticas e das estradas de transporte, turnos noturnos, visibilidade e disponibilidade de recursos.

No estudo de Rodovalho et al., (2016) presumiu-se um período de um ano para avaliação, a fim de abranger consistentemente todas as equipes, variáveis e condições operacionais. Um ano foi considerado suficiente para submeter todas as equipes à sazonalidade climática que ocorre durante o ano. Um sistema de sensores embarcados em caminhões foi desenvolvido para avaliar o desempenho dos equipamentos e as condições de operação em relação ao consumo de diesel. Um relatório do Australian Government, (2010) indica que a diversidade das condições das estradas de transporte tem um efeito direto no consumo de combustível. A Figura 33, ilustra a superfície topográfica da área de exploração mineira onde os estudos foram desenvolvidos.

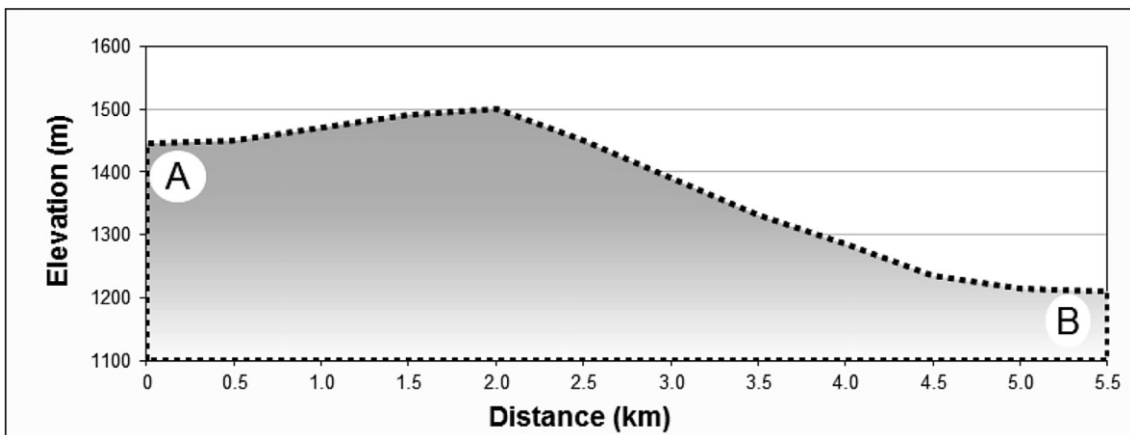
Na Figura 32, Rodovalho et al., (2016) aponta que as linhas representam as estradas de transporte ativas utilizadas pelos caminhões, com seus graus, entre os pontos de carga e descarga. O segmento formado pelos pontos A e B forma a rota AB, enquanto os pontos C e D formam a rota CD. Essas rotas foram selecionadas para que a influência do desempenho dos operadores pudesse ser avaliada de forma ampla e representativa. A rota CD representa o fluxo de estéril e a rota AB o fluxo de minério de ferro. A Figura 33 ilustra o perfil de elevação da rota AB, enquanto a Figura 34 mostra o perfil de elevação da rota CD.

Figura 32: Superfície topográfica com as estradas de transporte ativas consideradas no estudo.



Fonte: Rodovalho et al., (2016).

Figura 33: Perfil de elevação detalhado da rota AB.



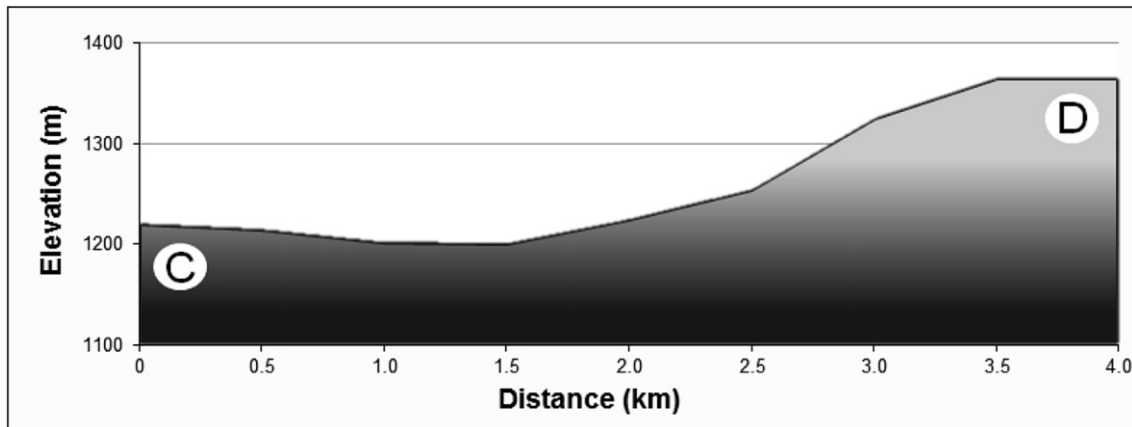
Fonte: Rodovalho et al., (2016).

Os pontos A e C são pontos de carregamento e B e D são pontos de despejo. A rota de transporte AB é considerada um gradiente favorável porque os caminhões são carregados na rampa e a gravidade auxilia no movimento. O perfil CD é considerado desfavorável porque os caminhões carregados sobem as rampas. Nessas estradas os

caminhões devem superar a resistência ao rolamento, gerada pelo atrito dos pneus com o pavimento, e a resistência ao gradiente. O desempenho dos caminhões de transporte depende do projeto das estradas de transporte da mina e das variações de gradiente (Thompson e Visser, 2006 *apud* Rodovalho et al., 2016).

Desta forma, todas as equipes e operadores estão sujeitos a diferentes tipos de estradas de transporte (Figura 34).

Figura 34: Perfil de elevação detalhado da rota CD.



Fonte: Rodovalho et al., (2016).

A operação da mina estudada possui uma frota de transporte de caminhões mecânicos e eletromecânicos, ambos com a mesma capacidade de carga. Todos os operadores são capazes de operar os equipamentos de ambas as frotas. A avaliação do fator humano foi realizada considerando caminhões mecânicos nas rotas AB e CD durante um ano. A análise estatística descritiva foi o primeiro passo para avaliar os dados gerados pelas cinco equipes de operação da mina. Gráficos boxplot foram usados para realizar esta análise e verificar se há *outliers*. Também é necessário avaliar se existem diferenças significativas em termos de consumo absoluto de diesel entre as equipes. Para isso é necessário realizar um teste de normalidade para avaliar o valor de p. Esta norma define o uso de métodos paramétricos ou não paramétricos para medir a relevância da variabilidade entre amostras (MONTGOMERY E RUNGER, 2007 *apud* RODOVALHO et al., 2016). Se a variabilidade entre as equipes não for significativa, pode-se considerar que não há diferença de consumo entre elas. Assim, a heterogeneidade técnica entre os operadores não corresponde a diferentes padrões de consumo, o que elimina a influência do fator humano (OSKOU EI, M.A. & AWUAH-OFFEI, K., 2014).

2.7.2 Seleção das variáveis para redução do consumo de diesel

Entre 2008 e 2009, o governo australiano analisou os balanços energéticos de 40 minas ativas e descobriu que 17% da energia vem da queima de combustíveis fósseis. Nessas unidades, foram implementados programas de redução de consumo de energia por meio da aplicação de rotinas de gerenciamento, controle e simulação. Como resultado dessas iniciativas, uma redução média de 6% no consumo de (Australian Government, 2010). Diante desse cenário, o desenvolvimento de rotinas e métodos para gerenciar o consumo de energia pode levar a um bom desempenho econômico para uma mineradora. Portanto, é necessário identificar, gerenciar e avaliar cada uma das variáveis que influenciam o consumo de combustível. Shafiee e Topal (2012, *apud* Rodovalho et al., 2016) afirmam que uma coleta de dados detalhados e abrangentes é a principal entrada de ferramentas de estimativa precisas e confiáveis usadas em projetos de mineração.

Segundo Motlogelwa e Minnitt (2013), o consumo de combustível está relacionado ao peso bruto dos caminhões. Thompson e Visser (2003) desenvolveram um modelo que relaciona o consumo de diesel com gradientes desfavoráveis e favoráveis, velocidade do caminhão, condições da estrada de transporte e resistência geral ao rolamento. Rodovalho et al., (2016) considera questões relacionadas à infraestrutura, velocidade das estradas de transporte, relacionar aspectos de gestão operacional e sazonalidade climática com o consumo de combustível. As atividades foram realizadas com a coleta de dados durante 12 meses em uma grande mina de ferro no Quadrilátero Ferrífero (região ferrífera do Brasil). A escolha do período foi baseada na necessidade de considerar o desempenho das operações nas estações seca e chuvosa. A jornada diária de trabalho da frota de caminhões é dividida em quatro turnos de 6 horas por dia, 7 dias por semana. A seleção das variáveis contempladas neste estudo é oriunda de dados de controles operacionais disponíveis em sistemas de gestão de frotas. A mineradora estudada forneceu controles para diversas variáveis de processo que podem influenciar no consumo de diesel. Todos esses dados são coletados automaticamente e foram obtidos de relatórios internos. Além das variáveis consideradas anteriormente, ou seja, o fator humano no consumo de combustível e o desempenho dos caminhões em diferentes graus, nesta seção serão consideradas algumas variáveis adicionais. Estes serão utilizados na construção do modelo para explicar o consumo de combustível em uma grande operação de mineração. Este modelo tenta mensurar a influência de cada variável que tem alta

correlação com o consumo de combustível. A Tabela 4 lista as variáveis consideradas em este estudo. Ao lado de cada variável há uma descrição e a unidade de medição.

Tabela 4: Lista de variáveis utilizadas para construir o modelo de simulação e o sistema de equações que explicam o consumo de combustível nas operações de transporte.

Lista de variáveis utilizadas para construir o modelo de simulação e o sistema de equações que explicam o consumo de combustível nas operações de transporte.

Investigado variáveis	Descrição	Unidade
Material de pavimentação	Número de lixões (massa total) que se destinavam à construção ou reparação do pavimento da estrada de transporte.	Despejos/semana
Infraestrutura FI	Número de lixões (massa total) que foram utilizados para a construção de bermas de segurança, estradas de transporte, rampas e aterros.	Despejos/semana
CI	Massa total de itabiritos triáveis usados para a manutenção ou construção do pavimento rodoviário de transporte	t/semana
Laterita	Massa total de itabiritos compactos usados para a manutenção ou construção do pavimento rodoviário de transporte	t/semana
Motoniveladoras	usada para manutenção ou construção do pavimento rodoviário de transporte	t/semana
Tratores de rodas	motoniveladora para manutenção de estradas de transporte	Número total de horas de operação de trator de rodas para manutenção de estradas de transporte
Chuva	Precipitação semanal média na área da mina	Horas/semana
Volume de trafego	Número médio semanal de ciclos até um destino, partindo de um ponto de carregamento e passando por um determinado caminho até um ponto de despejo.	Despejos/hora
UD	Distância total semanal em inclinações desfavoráveis (contra a carga)	Metros
FD	Distância total semanal em graus favoráveis (com a carga)	Metros
AHD	Distância média de transporte (por semana)	Metros
Velocidade média semanal dos veículos descarregados	LS	Velocidade média semanal
dos veículos carregados	Consumo de combustível	Quilômetros/hora
	Volume total de combustível consumido	Litros

Fonte: Rodovalho et al., (2016).

A aplicação de ferramentas de análise estatística e técnicas de modelagem à mineração mostrou-se uma alternativa eficaz na gestão dos custos operacionais de acordo com Rodovalho et al., (2016). O modelo desenvolvido identificou pontos críticos no processo produtivo e também classificou cada variável em ordem de prioridade. Esse resultado otimiza recursos e esforços para travar desvios e perdas no processo. Num ambiente econômico em que o controle e a redução dos custos operacionais se torna fundamental para as organizações se manterem no mercado, este método dá uma contribuição relevante. Como o consumo de combustível está diretamente relacionado ao controle de custos na indústria de mineração, o objetivo do estudo de Rodovalho et al., (2016) foi alcançado com a validação do modelo. A implantação desse método na rotina da operação de mineração com recursos disponíveis e sem grandes investimentos também representa um avanço para a indústria.

Entre os resultados alcançados por Rodovalho et al., (2016) está a redução do consumo de combustível dos caminhões mecânicos e eletromecânicos. A redução no consumo de combustível atingiu 10% para a frota de caminhões mecânicos e 4% para os caminhões eletromecânicos. Essa é uma redução maior do que a alcançada por outras minas citadas durante o estudo, onde a aplicação de técnicas semelhantes representou uma redução média de 6% no consumo de combustível. Essa vantagem é atribuída principalmente à eficiência do sistema de gerenciamento de frota que abrange todos os equipamentos de mineração. O método mostrou-se válido e aplicável a outros

empreendimentos de mineração de todos os portes, pois é uma ferramenta adequada para a identificação e priorização de pontos críticos para os custos operacionais. O requisito básico para a implantação deste modelo em outras minas é a disponibilidade de dados para modelagem. Recomenda-se um sistema de gestão de frotas, pois proporciona maior precisão ao estudo. Além disso, cada mina tem um grupo de variáveis com maior influência no consumo de combustível.

2.7.3 Otimizando as estradas de transporte de minas para reduzir o consumo de combustível dos ativos

Segundo Richardson & McIver (2015), o Sistema Minestar da Caterpillar identifica que: “As condições da estrada de transporte determinam a velocidade, o consumo de combustível, a vida útil do pneu, a segurança e a tonelagem anual movimentada. Superfícies limpas e lisas prolongam a vida útil dos pneus para caminhões de transporte de minas e reduzem a chance de danos à máquina ou acidentes devido a perigos na estrada. As inclinações suaves e constantes minimizam as trocas de marcha, permitem que os motoristas mantenham velocidades médias mais altas, permitem um esforço de frenagem mais constante nos retornos e reduzem o derramamento de material na pista e o consumo de combustível.

Por outro lado, estradas de transporte de mineração mal projetadas ou mantidas podem levar a custos dramaticamente aumentados causados por perda de tempo de produção, redução da vida útil dos pneus, maior uso de combustível, desgaste excessivo de componentes, reparo e substituição de equipamentos importantes e problemas de segurança. Mesmo estradas de transporte excepcionalmente projetadas exigem tempo e esforço para manter a melhor forma. A manutenção regular ajuda a eliminar as pequenas diminuições na velocidade - e aumentos nos tempos de ciclo - que afetam negativamente a produção horária e anual.”

Os autores, Richardson & McIver (2015), foram solicitados a desenvolver um sistema para medir a rugosidade da estrada que forneceu relatórios diários para um local de mina. O objetivo dos relatórios era quantificar a rugosidade das estradas e identificar áreas que requerem manutenção.

O sistema desenvolvido utiliza:

1. Um telefone inteligente Android;
2. Conexão com a Internet;

3. Uma placa de dados de entrada/saída (6 canais analógicos e 6 canais digitais);
4. Um acelerômetro triaxial montado por cabo;
5. Software de análise.

O sistema é instalado em Caminhões de Transporte, Carrinhos de Água e veículos leves e depois calibrado para o veículo.

De acordo com Richardson & McIver (2015) os dados de aceleração triaxial são registrados em 100Hz e os dados do Sistema de Posicionamento Global (GPS) são registrados em 1Hz. Aproximadamente a cada 5 minutos, os dados gravados são transmitidos usando uma conexão de internet para um servidor. Os dados coletados para um dia de operações são então processados, para cada posição GPS é atribuído um valor de rugosidade da estrada codificado por cores. Com base nos dados de GPS, os dados de rugosidade da estrada processados podem ser sobrepostos em uma imagem do terreno. Os dados processados permitem que o local da mina implemente estratégias de manutenção diária para melhorar a rugosidade da estrada (Figura 35).

Usando os dados de sistemas combinados e algoritmos específicos do veículo, o consumo de combustível do veículo é estimado, portanto, comparações em termos de consumo de combustível podem ser feitas. Permitindo que as minas avaliem o efeito da rugosidade da estrada em termos de queima de combustível. Os dados coletados estão sendo analisados para permitir que novos algoritmos sejam escritos que prevejam onde ocorrerão falhas nas estradas de transporte, para permitir que estratégias de manutenção preventiva sejam empregadas. O sistema está sendo adaptado para criar uma metodologia para avaliar a eficácia das operações de caminhões pipa e motoniveladoras (RICHARDSON & MCIVER, 2015).

Figura 35: Uma operação de veículo em dados de rugosidade de uma estrada no local da mina. Inicialmente, o veículo está saindo de um estacionamento de caminhões, em seguida, deslocando o material e retornando ao estacionamento de caminhões.



Fonte: Richardson & McIver (2015).

2.8 Sistema de detecção de obstáculos baseado em imagens RGB e nuvem de pontos

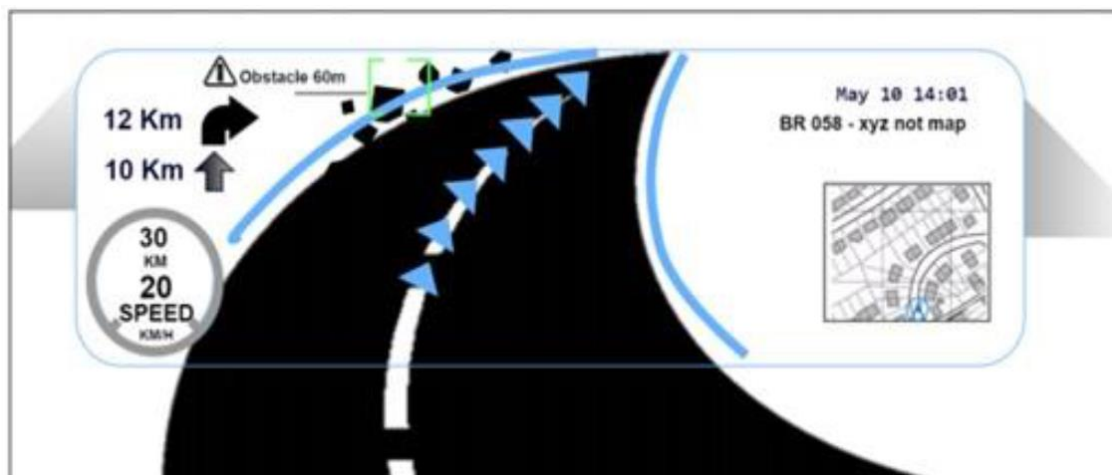
Segundo Klafke et al., (2019) as minas no Brasil em que predominam o clima tropical sofrem o impacto das condições climáticas adversas, principalmente nos períodos chuvosos, com neblinas intensas. Para os caminhões do setor de mineração, o risco de acidentes é causado principalmente por comportamento humano e condições adversas de operação. Trafegar em uma mina depende de inúmeras variáveis e uma delas é a condição climática associada a baixa luminosidade, que podem prejudicar a visibilidade do operador.

É de grande importância para o setor mineral viabilizar a operação dos equipamentos mesmo em condições adversas de visibilidade. A redução das horas ociosas permite aumentar a produtividade dos ativos e, conseqüentemente, a produção da mina. Nos últimos anos, veículos e equipamentos com tecnologias embarcadas estão cada vez mais inseridos no setor de mineração. O crescimento dessas tecnologias permite direcionar pesquisas com o objetivo de aumentar a segurança na operação, oferecer conforto e outras facilidades para o usuário (KLAFKE et al., 2019).

Segundo Freitas (2015), os equipamentos inteligentes e automatizados vêm se tornando cada vez mais atrativos na cadeia de produção mineral, com aplicações de logísticas automatizadas e preparadas por uma central de operações. Na indústria da mineração vêm crescendo a utilização dessas soluções e equipamentos, visando melhorar o desempenho, condições de saúde e segurança, buscando assim afastar os trabalhadores de áreas de risco.

Conforme Klafke et al., (2019) para melhorar a segurança e produtividade das operações está sendo desenvolvido o projeto “Sistema de Direção Assistida para Caminhões”. A solução disponibiliza dados referentes a rota, localização, obstáculos e velocidade que serão captados por dispositivos instalados no veículo (Figura 36). Assim, entende-se que o sistema estará conectado a um conjunto de sensores, que coletam e realizam o processamento e fusão dos dados para que em seguida possa exibir informações úteis para o usuário, sendo este o motorista do veículo.

Figura 36: Conceito da interface para o painel do operador.



Fonte: (Relatório de Acompanhamento “Projeto Direção Assistida”, 2017).

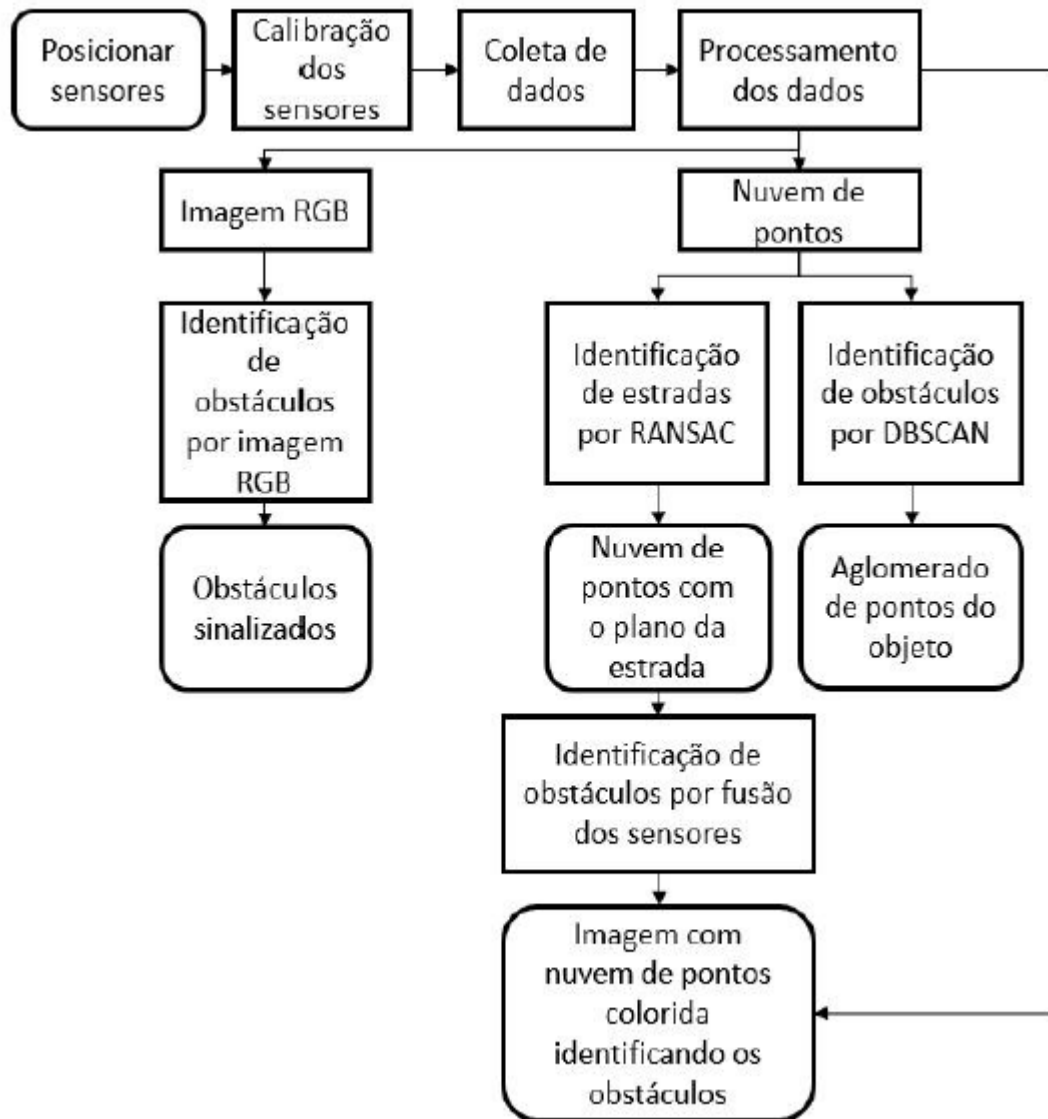
O estudo de Klafke et al., (2019) demonstra que em uma etapa preliminar do “Projeto de Direção Assistida”, são utilizados dados obtidos em boas condições de visibilidade de apenas dois sensores: laser 3D e câmera de vídeo RGB. Também é importante ressaltar que todo o processamento é realizado através de fotos e nuvem de pontos estáticos através de processamento off-line.

A imagem digital formada por câmeras fotográficas ou de vídeo é detectada através da radiação proveniente do objeto, sendo emissão ou reflexão, e transformada em um sinal para que possa ser registrado e apresentado de forma adequada à extração de informações (Gonzales et al., 2007 *apud* Klafke et al., 2019).

O processamento de dados provindos do laser promove o mapeamento dos ambientes e identifica objetos em baixa luminosidade. Este corresponde a um sensor ativo, ou seja, o dispositivo emite feixes de laser e registra os sinais refletidos, que são menos afetados pelas condições de luminosidade. Dessa forma, métodos para detecção e extração de objetos em uma nuvem de pontos são de grande importância (MARCON & FERRÃO, 2016).

Os processos de identificação de estradas e obstáculos através de imagem e nuvem de pontos são realizados separadamente, ou seja, sem interação entre eles. Depois, são usados os resultados de ambos os sensores para identificação por fusão dos dados. A Figura 37 ilustra o fluxograma para identificação de estradas e obstáculos estudados por Klafke et al., (2019).

Figura 37: Fluxograma do processo de detecção de estradas e obstáculos através de imagem e nuvem de pontos.



Fonte: Retirado de Klafke et al., (2019).

O sistema de laser scanner pode ser usado pra gerar uma nuvem de pontos de três dimensões. O sistema emite pulsos de laser que são direcionados para o ambiente até ser interrompido por objetos ou pelo alcance do sensor. Tais objetos refletem os pulsos que retornam para o laser. Assim, a distância entre o objeto e o sensor pode ser calculada através do intervalo de tempo existente entre a emissão e a reflexão de cada pulso emitido. Esse sistema de funcionamento é conhecido como tempo de voo (Dalmolin e Santos, 2004 *apud* Klafke et al., 2019).

2.9 Tecnologia aplicada nesse estudo

A elevada taxa de transporte em minas a céu aberto torna necessárias a inspeção constante e, conseqüentemente, a manutenção das vias. Quando não há essa atenção especial às estradas de mina, os custos na operação e manutenção aumentam consideravelmente.

Thompson e Visser (2003) desenvolveram formas de gestão de manutenção aplicável às estradas de transporte de minas. Nesse estudo, existe a avaliação visual que classifica os defeitos da estrada de acordo com seus tipos e graus de gravidade. A soma dos índices constituirá uma pontuação de defeitos que estão relacionados ao rolamento através de um modelo. Todos os fatores de custo, como consumo de combustível, desgaste e manutenção de veículos e de vias, estão relacionados para a pontuação de defeitos na estrada.

Assim, surgem tecnologias de gerenciamento desses eventos de danos às pistas, que proporcionam respostas referentes à qualidade das estradas de mina. Essas novas tecnologias são de grande apoio aos técnicos da área, auxiliando-os a obter informações para atuação direta nos problemas críticos das vias.

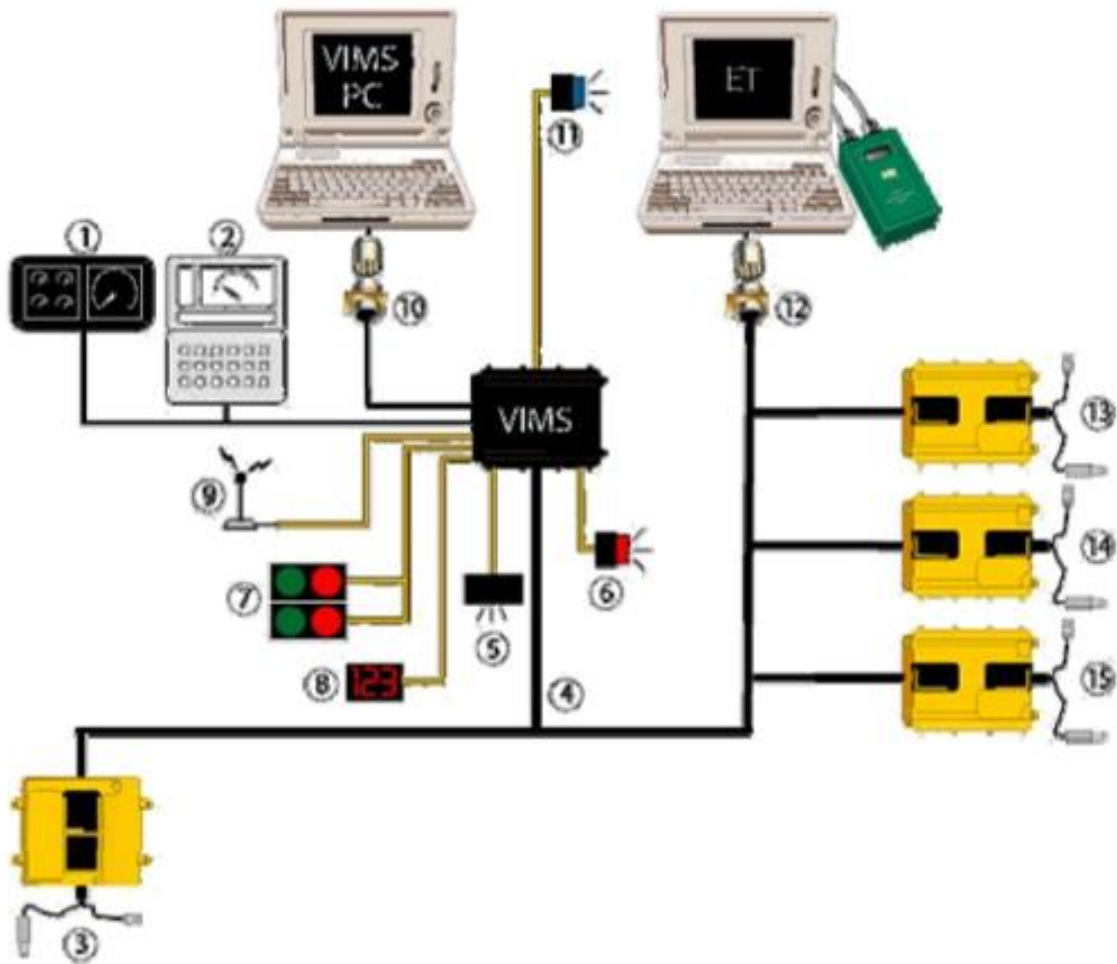
2.9.1 VIMS

O VIMS é um sistema integrado exclusivo da Caterpillar®, que monitora o desempenho da máquina para fornecer informações críticas em tempo real.

Esse sistema exporta dados para análise de gravidade do aplicativo (ASA) e Controle de Análise Rodoviária (RAC) para quantificar as condições da estrada de transporte (CATERPILLAR, 2006).

O VIMS, Figura 38, melhora o gerenciamento de carga útil para otimizar a velocidade. Esse sistema verifica os eventos para altas temperaturas de freio, excesso de velocidade do motor, etc.

Figura 38: Sistema VIMS.



Fonte: Retirado de Caterpillar, (2006).

2.9.2 Road Analysis Control (RAC)

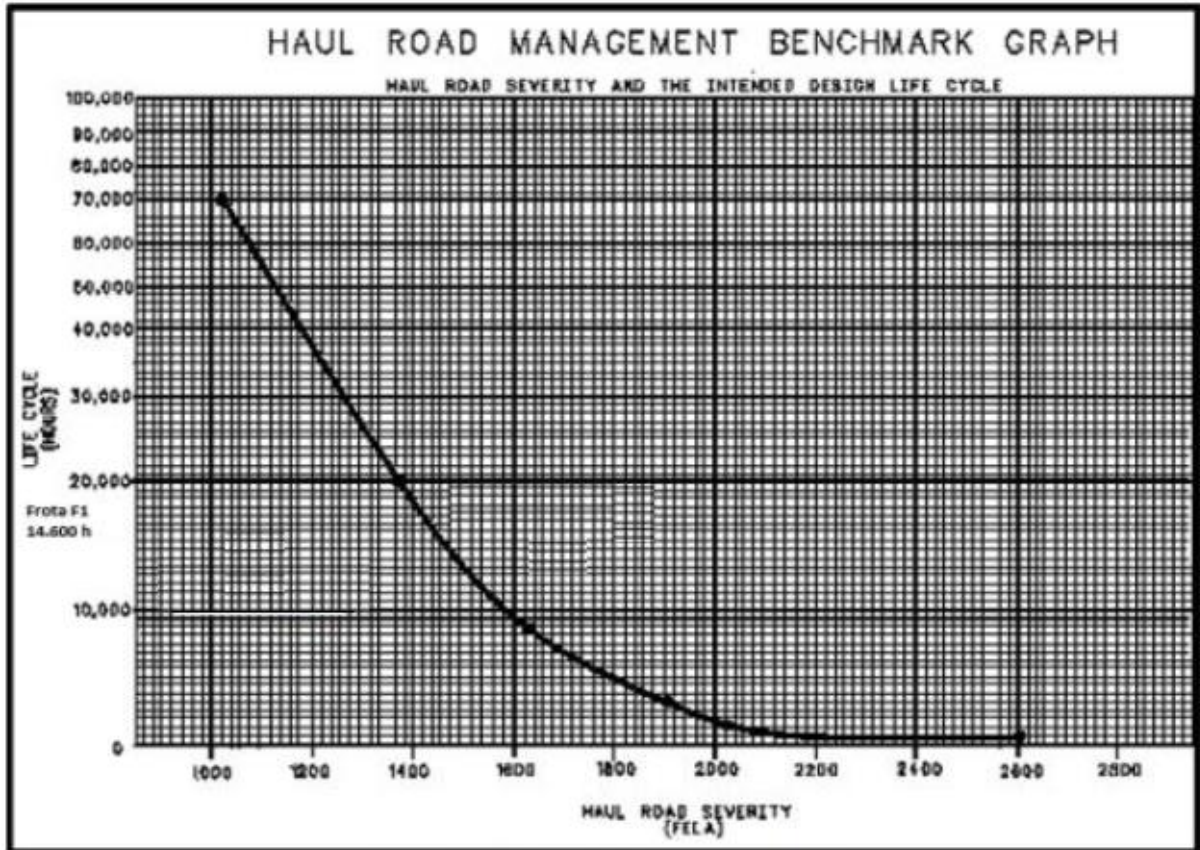
O HEALTH é um sistema do Cat® MineStar™, sendo este um produto de alta tecnologia da informação a bordo. Tal sistema foi projetado para coletar, em campo, dados de anormalidades tanto da operação quanto de falhas que podem surgir no ativo. A vantagem desse sistema é a atuação imediata em situações críticas e análises sistemáticas (CATERPILLAR, 2006).

O HEALTH comunica com o VIMSTM, que cria o banco de dados e armazena os eventos RAC pela medição FELA (*Fatigue Equivalent Load Analysis*).

Os dados de *input* do FELA (Figura 39) são apresentados a partir da diferença de pressão no sistema de suspensão, de forma que o deslocamento vertical entre o solo e um ponto no aro de cada pneu gera um perfil de anormalidade quando o sistema encontra

uma irregularidade no terreno, apresentando um gráfico de Ciclo de Vida do Equipamento em “Horas × Grau de severidade” (Psi).

Figura 39: Representação gráfica referente ao FELA.



Fonte: (CATERPILLAR, 2006).

O RAC (*Road Analysis Control*) fornece *feedback* ao operador sobre condições das vias prejudiciais aos componentes do ativo.

Trata-se de um produto de informação que permite ao cliente monitorar as condições das estradas de transporte e otimizar o desempenho, a produtividade e a segurança dos caminhões da mineração de grande porte. Essa tecnologia contribui para reduzir os custos de reparo, manutenção e o tempo de inatividade (CATERPILLAR, 2006).

O RAC funciona desta forma:

- Coleta os dados de pressão de cada suporte 10 vezes por segundo.
- Mede as diferenças entre os suportes para determinar:
 - *Pitch*: pressões do amortecedor da roda do eixo dianteiro e traseiro;
 - *Rack*: pressões diagonais do amortecedor da roda;

– *Bias*: pressões do amortecedor de lado a lado.

- Desenvolve o Índice de Análise de Carga Equivalente de Fadiga (FELA) para estabelecer uma gravidade relativa de cada ciclo.
- Calcula tendências e gerencia eventos no VIMS.
- Correlaciona as medições de *pitch* e *rack* com os limites de projeto aceitáveis predeterminados.

O RAC fornece *feedback* de “evento” em tempo real para o operador, possuindo dois níveis de aviso por meio do VIMS a bordo:

- Nível I – A luz de alerta do VIMS e a mensagem de aviso “Limites de inclinação e *rack* máximos” foram medidos – “Reduza a velocidade”.
- Nível II – Luz de alerta VIMS e mensagem de advertência “Inclinação máxima e medições de *rack* muito altas – Vá devagar, evite a área”.

Integrado ao VIMS® (*Vital Information Management System*), o RAC fornece *feedback* em tempo real ao operador sobre as condições da estrada de transporte que são prejudiciais aos tempos de ciclo e trem de força, quadro, componentes da suspensão e pneus (CATERPILLAR, 2006).

Por meio da central de mensagens do VIMS, dois níveis de eventos RAC alertam o operador sobre locais na estrada de transporte que requerem atenção, tanto do ponto de vista da operação do caminhão quanto dos equipamentos de apoio. O operador precisa atuar desacelerando ou evitando áreas que desencadeiam os eventos, e os equipamentos de apoio devem ser designados para sanar as áreas problemáticas (CATERPILLAR, 2006).

Quando se usa um sistema de telemetria, como o VIMS *wireless* da Caterpillar, essas informações podem ser transmitidas quase em tempo real para a supervisão ou o gerenciamento da mina no escritório, de modo que é possível agir imediatamente.

O VIMS registra informações de RAC, ou seja, dos dados de *rack*, *pitch* e *bias* de cada ciclo, criando medições resumidas chamadas FELA, permitindo que o gerenciamento rastreie a gravidade e as condições da estrada de referência. Utilizando os mesmos sensores que determinam o peso de carga útil e os tempos de ciclo, o RAC mede o *rack* e o passo do quadro dez vezes por segundo (CATERPILLAR, 2006).

Os sistemas de suspensão dos ativos são compostos de sensores de pressão de óleo, que têm por objetivos o controle telemétrico de *payload* do equipamento e a

mensuração de variações atuantes enquanto ocorre o transporte da carga (CATERPILLAR, 2006).

Entre as principais vantagens do RAC estão:

- aumento da produtividade;
- menor custo do pneu;
- redução da fadiga do operador;
- aumento da vida útil do chassi;
- maximização da utilização do equipamento de suporte;
- extensão da vida útil do componente.

Quando o custo por hora diminui, aumentando a produção em toneladas por hora, há uma redução no custo por tonelada, conforme demonstra a equação 15:

$$\frac{\text{custo por hora}}{\text{toneladas por hora}} = \text{custo por tonelada} \quad (15)$$

Os valores de pressão obtidos nas medições de cada ponto individual de suspensão e rodas são relacionados com a posição entre as seguintes combinações de eventos:

Rack

O *rack* é a torção lateral do chassi devido ao carregamento desigual nos pneus diagonais.

Quando um caminhão totalmente carregado, com o pneu traseiro direito em uma inclinação e o pneu dianteiro esquerdo em um sulco, são geradas forças excessivas no chassi, sendo essa uma forma de ocorrência do *rack*, conforme a Figura 40.

Figura 40: Disposição das cargas geradoras de rack.

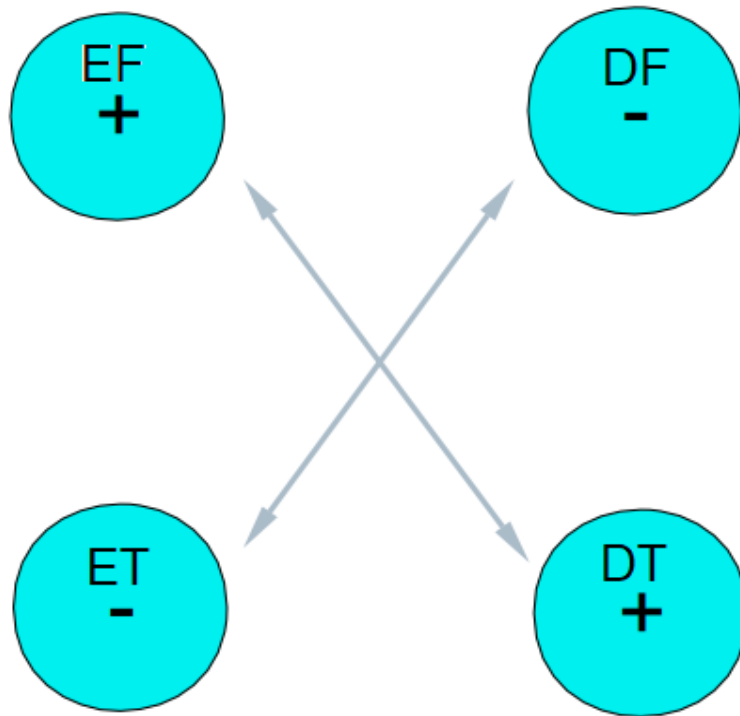
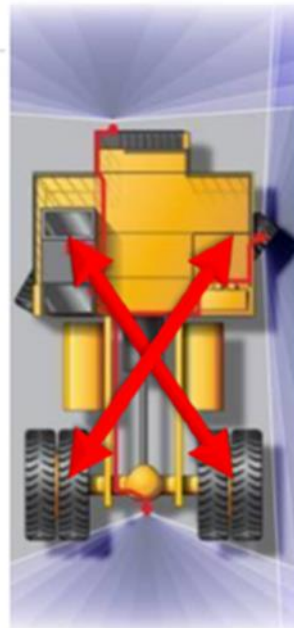
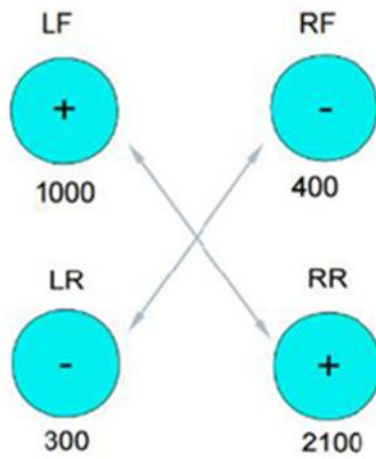


Figura 41: Exemplo de esquema de rack.

$$\text{RACK} = (\text{LF} + \text{RR}) - (\text{RF} + \text{LR})$$

eg: $(1000 + 2100) - (400 + 300) = 2400$ PSI RACK



O *rack*, então, é a torção do caminhão devido a forças dinâmicas irregulares (evento mais crítico aos componentes do equipamento).

Uma condição de *rack* (Figura 41), pode ocorrer quando um caminhão está carregado e atinge um buraco com um dos pneus.

Pitch

O *pitch* é a força no chassi de frente para trás que ocorre quando o caminhão cruza um solavanco ou realiza um mergulho perpendicular à linha de deslocamento, (Figura 42), frenagem brusca ou curvas bruscas.

O *pitch* ocorre por forças longitudinais, (Figura 43) sendo a força de balanço no caminhão, da frente para traseira. As forças de *pitch* podem ocorrer devido a:

- rampas com forte inclinação;
- frenagens bruscas;
- passagens em buracos cuja largura equivalha à do caminhão.

Figura 42: Disposição das cargas geradoras de *pitch*.

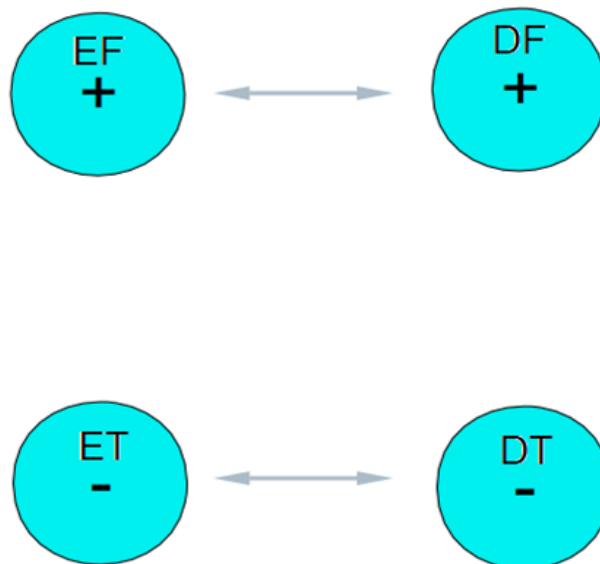
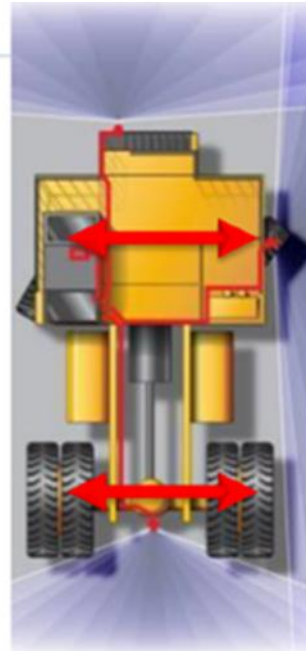
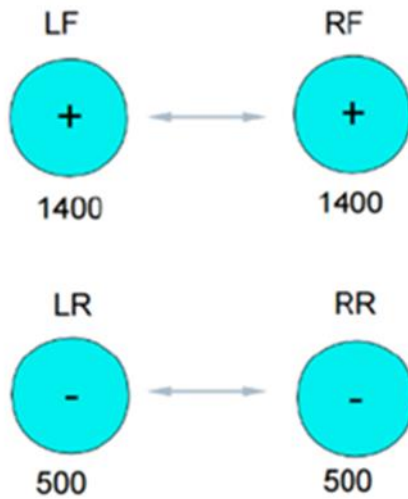


Figura 43: Exemplo de esquema de pitch.

$$\text{Pitch} = (\text{LF} + \text{RF}) - (\text{LR} + \text{RR})$$

eg: $(1400 + 1400) - (500 + 500) = 1800$ PSI Pitch



Bias

Bias são as forças transversais atuantes no ativo, ou seja, é a força que pode resultar em um tombamento lateral do caminhão (Figura 44). Uma condição de *bias* pode acontecer em virtude de:

- tráfego em estrada fortemente abaulada (inclinada lateralmente);
- carga descentralizada;
- velocidades elevadas em curvas;
- curvas com ausência de superelevação correta e/ou curvas muito fechadas.

Figura 44: Disposição das cargas geradoras de bias.

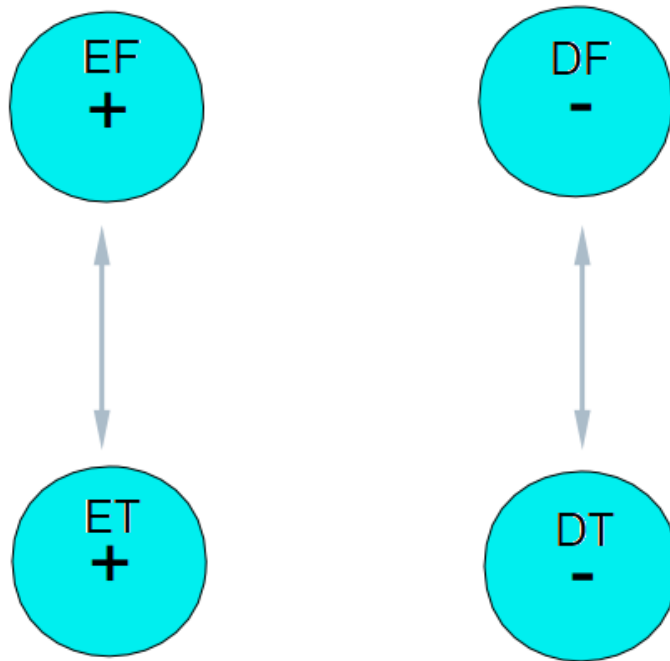
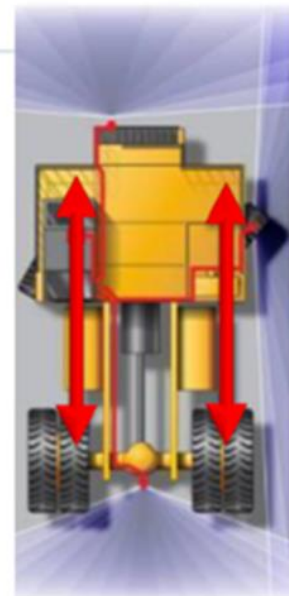
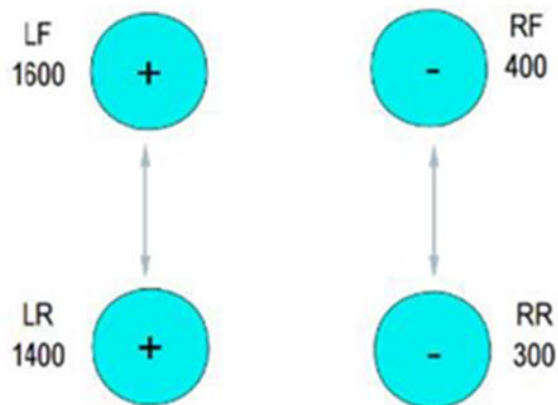


Figura 45: Exemplo de esquema de bias.

$$\text{Bias} = (\text{LF} + \text{LR}) - (\text{RF} + \text{RR})$$

eg: $(1500 + 1400) - (400 + 300) = 2300$ PSI Bias



Os benefícios da ferramenta RAC são:

- manutenção adequada das estradas de transporte;
- tempos de ciclo mais rápidos;
- maior vida útil dos componentes, chassi, suspensão e pneus;

- menos estresse físico do operador e maior conforto;
- operação mais segura;
- consumo de combustível reduzido;
- custos operacionais mais baixos.

O RAC mede esses valores e os envia quase instantaneamente para o módulo VIMS integrado, que calcula eventos e tendências. A partir daí, as medições extremas são exibidas ao operador, e todas as informações são registradas para *download* com o *software* VIMS.

Ao monitorar esses dados, o engenheiro de mina identifica os trechos de estradas de transporte que afetam os tempos de ciclo e a vida útil dos componentes.

Os resultados obtidos com esse controle são estradas de transporte adequadamente mantidas, o que significa condições de operação mais seguras, menor desgaste mecânico, menos estresse físico e maior conforto para o operador, consumo de combustível reduzido, menor custo de risco de pneus na estrada, custos operacionais de suspensão e componentes e mais tempo de atividade.

O RAC foi projetado para dar apoio aos usuários de caminhões de mineração de grande porte na obtenção de mais valor de sua experiência de propriedade e operação.

É importante destacar que o problema não é a ocorrência do evento em si, mas os danos que as frequentes ocorrências causarão aos componentes do caminhão, especialmente ao chassi e aos pneus.

Esses danos geram uma gama elevada de manutenções, aumentando o custo das operações de mina e manutenção.

Capítulo 3

3. Materiais e métodos

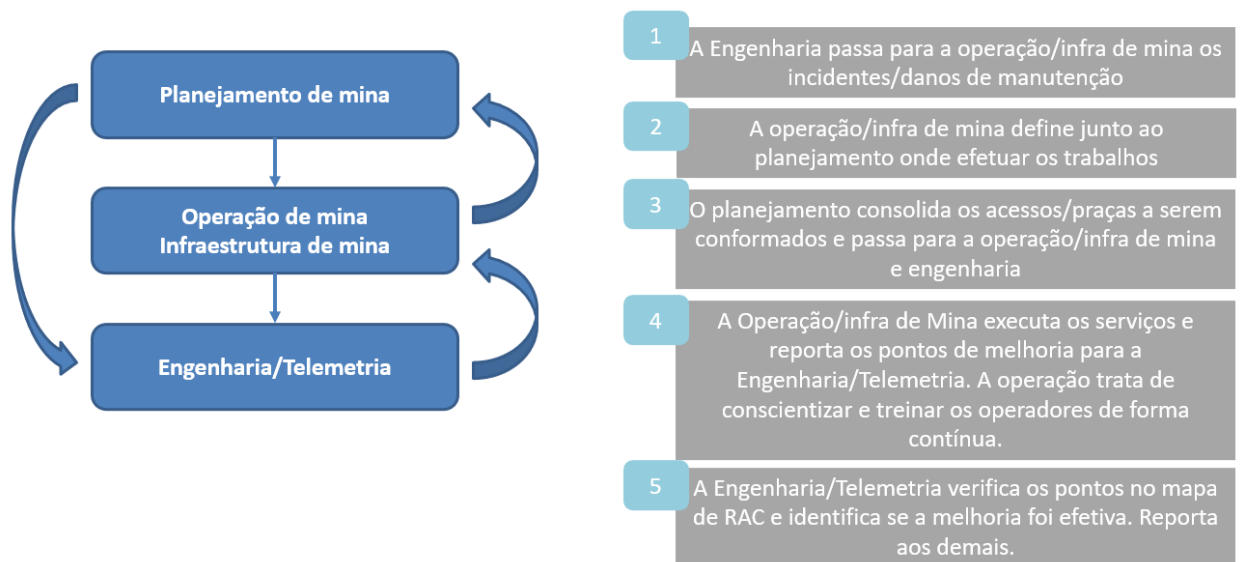
Nos empreendimentos de mineração, a etapa de projetos é a que mais tem impacto na rentabilidade do negócio, uma vez que, nessa fase, as importantes decisões são tomadas, como: a seleção dos equipamentos, a escolha de materiais para forro, a época do ano ideal para atuar com afinco nos acessos e como serão medidas as melhorias realizadas.

A metodologia usada foi uma identificação inicial das vias que estão muito defeituosas na mina em estudo, que afetam diretamente as operações dos ativos.

Foram realizadas reuniões semanais com a operação e a infraestrutura de mina para alinhar as ações a serem tomadas diante dos problemas de frota que se tornaram constantes.

Então, com a necessidade de otimizar as operações, foi solicitado o apoio do planejamento de mina para realizar a reconstrução e a readequação dos acessos. Com todas as áreas alinhadas, conforme a Figura 46, criou-se o seguinte fluxo para adequar as etapas do processo:

Figura 46: Fluxo de responsabilidades das áreas envolvidas.

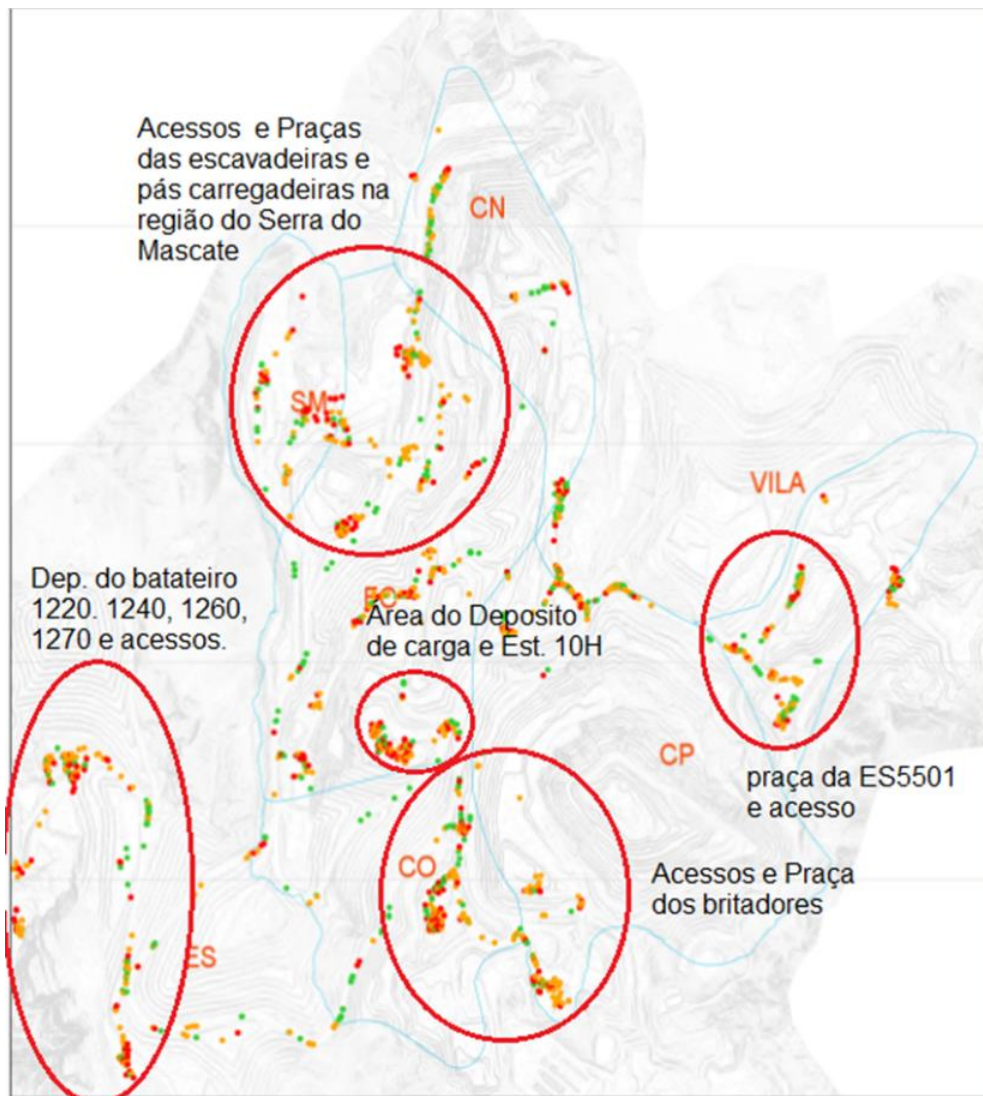


O fluxo consiste na metodologia PDCA, seguindo as etapas de alinhamento: a engenharia e a telemetria entregam para a operação e a infraestrutura de mina os locais principais onde houve incidentes com as frotas.

Logo, operação, infraestrutura e planejamento de mina definem quais acessos conformar, realizando um projeto que demonstra as ações a serem tomadas. Após essa definição, a operação e a infraestrutura de mina atuam na execução das atividades; por fim, a engenharia e a telemetria verificam as ações realizadas, indicando para o planejamento, a operação e a infraestrutura de mina se as medidas tomadas estão sendo efetivas.

Com base em informações de situações de falha que ocorrem devido à irregularidades nas vias – como falhas na suspensão dos caminhões e no sistema de freios, trincas em chassis e outras situações –, as equipes de engenharia e telemetria apontam locais em que são necessárias melhorias de acessos e praças, principalmente nos locais apontados pela ferramenta RAC, como se pode identificar na Figura 47:

Figura 47: Mapa de rack, pitch e bias retirado do sistema HEALTH presente no Cat® MineStar™.



Os locais com maiores índices de ocorrências apontados pelo levantamento de dados da ferramenta RAC foram visitados e fotografados pela engenharia para a criação do relatório para a operação de mina.

As figuras seguintes retratam os pontos apresentados no mapa, circulado em vermelho. Estão identificados através dos nomes apresentados no mapa da Figura 42.

A Figura 48 apresenta a praça de atuação da escavadeira ES5501 referente à região sudeste circulado no mapa.

Figura 48: Praça da ES5501.



Na Figura 49, pode-se identificar a área de acessos e a praça do britador:

Figura 49: Área de acessos e praça do britador.



Na Figura 50, identifica-se a região da Serra do Mascate:

Figura 50: Região da Serra do Mascate.



Na Figura 51, pode-se identificar a área do acesso 10H, entroncamento com o acesso 10M (Trevo da 4I).

Figura 51: Acesso 10H, entroncamento com o acesso 10M (Trevo da 4I).

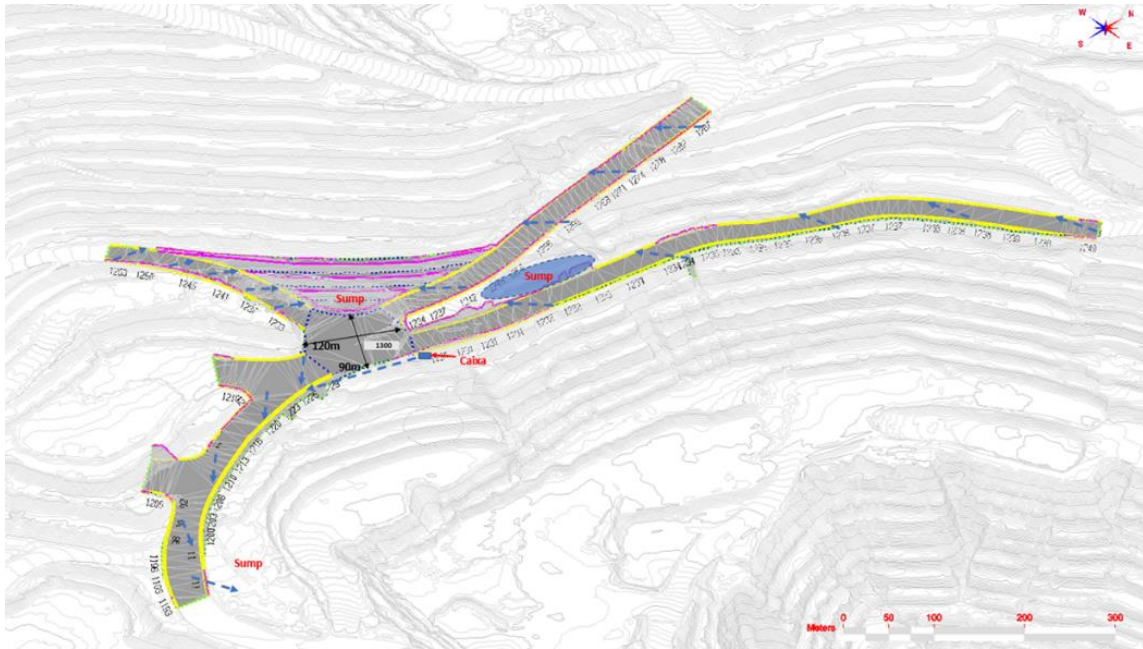


O planejamento de mina desenvolveu, então, os projetos de acessos, considerando drenagem e alargamento de vias para atender às premissas estabelecidas pela geometria da mina. Os primeiros acessos definidos foram o acesso 10H (entroncamento com 4I e 10M) e os acessos PCN-06/10K e 13T.

A Figura 52 representa o projeto do acesso 10H (entroncamento com 4I e 10M). Esse projeto apresenta a ampliação do Trevo 4I, com especificação de largura de acesso de 30 metros, raio de curvatura de 33 metros e inclinação da rampa com o máximo de 10%. A capacidade do *sump* é 23 m³.

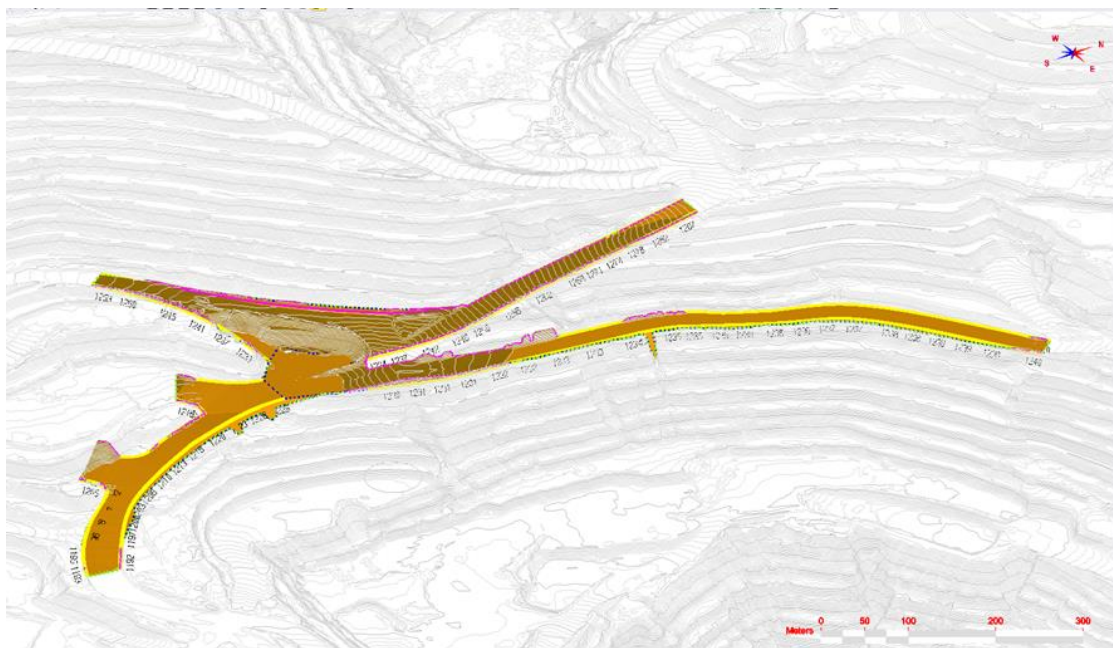
Esses dados estão de acordo com valores recomendados pela Caterpillar®.

Figura 52: Projeto do acesso 10H, entroncamento com 4I e 10M.



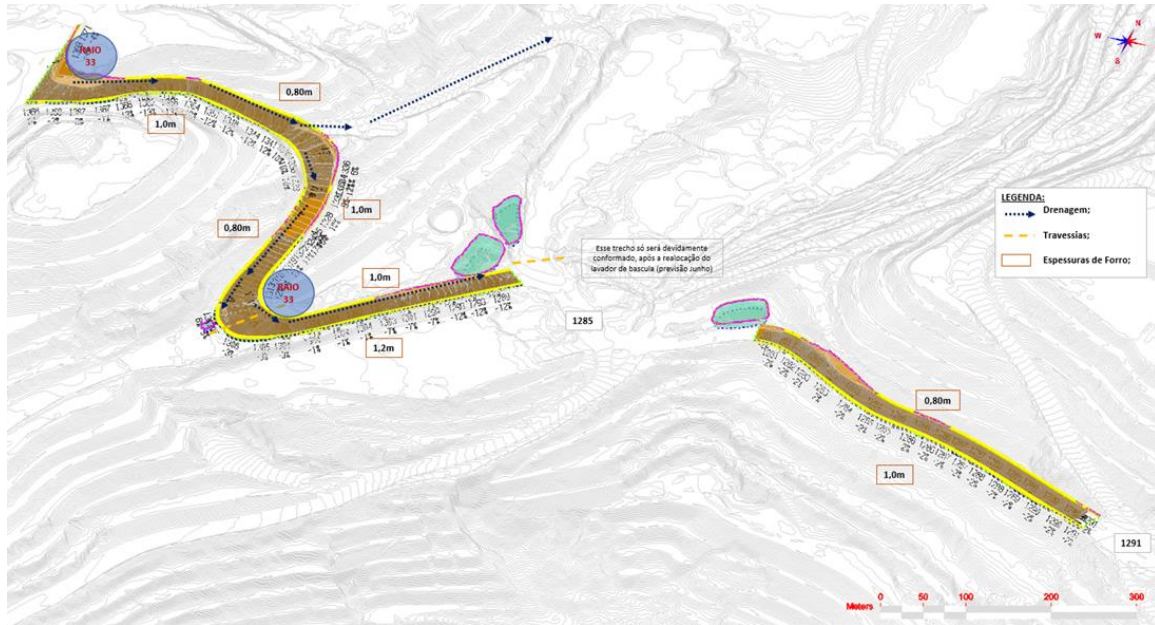
A Figura 53 demonstra o acesso em processo de *cut and fill*. Esse processo consiste em retirar 232.000 m³ de material da área hachurada e construir uma camada de forro no acesso.

Figura 53: Projeto do acesso 10H, entroncamento com 4I e 10M, demonstrando o cut and fill (corte e enchimento).



De acordo com a Figura 54, o projeto do acesso apresenta o aumento dos raios (33 m), com especificação de largura de acesso de 30 metros e inclinação da rampa com o máximo de 10%. Para esse acesso, foram mensurados os volumes de forro: PCN (47 km³) e 13T (45 km³). Esses dados estão de acordo com os valores utilizados pela Caterpillar®.

Figura 54: Projeto do acesso PCN-06/10k e acesso 13T.



Logo, a operação e a infraestrutura de mina verificam os materiais da mina adequados para construção e conformação de acessos. Esses materiais são identificados por oportunidade no entorno do empreendimento mineiro. A Figura 55 apresenta o material considerado ideal para a base de acesso, de acordo com o que é encontrado no entorno do empreendimento, que consiste em um itabirito de granulometria mais grosseira e alta competência para adequar essa camada.

A Figura 56 apresenta o material para forro de acesso. Trata-se de um material com granulometria regular e possui maior umidade. Esse é um fator que não é adequado, pois em tempo médio acaba acarretando início de defeitos na pista.

A Figura 57 apresenta o material ideal para acabamento e paliativos de acesso (itabirito compacto). Os materiais utilizados para cada serviço foram estipulados baseados nos materiais presentes no entorno do empreendimento e que são competentes o bastante para cada camada dos acessos.

Figura 55: Material base de acceso.



Figura 56: Material forro de acceso.



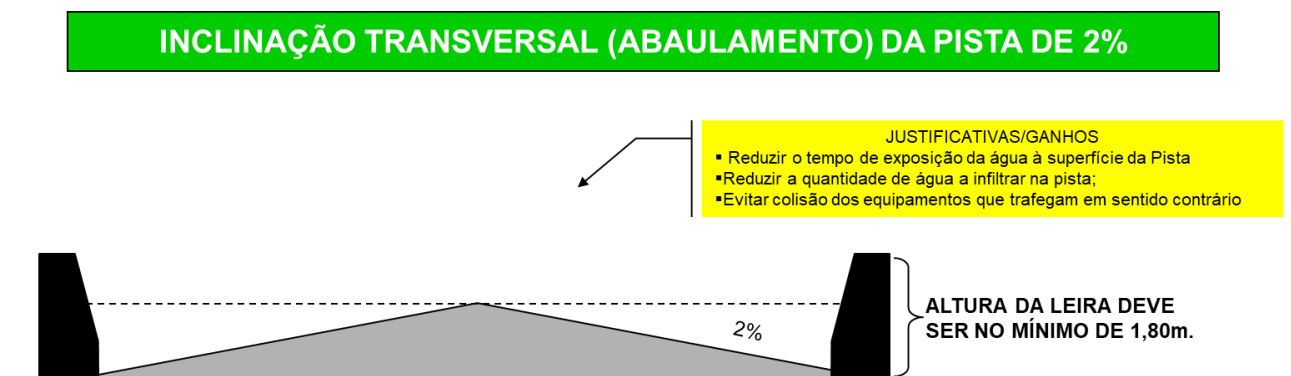
Figura 57: Material a cabamento de acessos.



Esses materiais são usados para a formação das camadas dos acessos da mina pela infraestrutura de mina junto à operação desta.

Assim, a inclinação transversal das pistas é realizada com abaulamento de até 2%, conforme Figura 58:

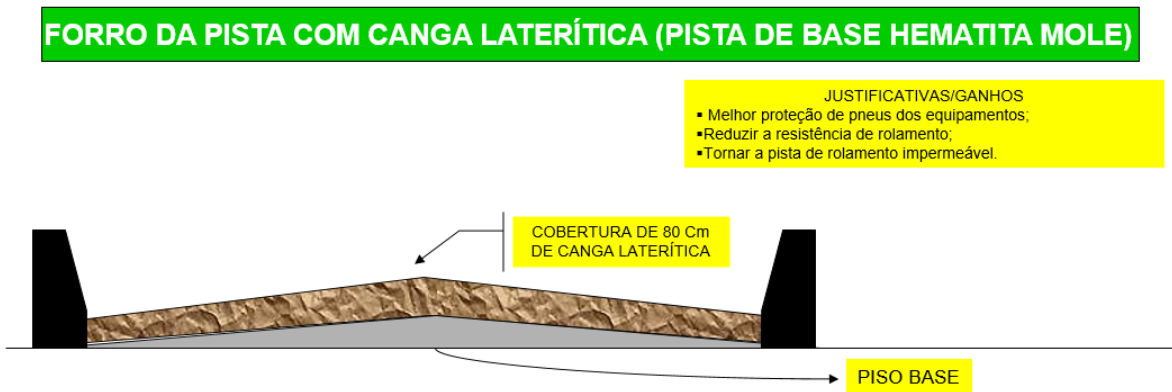
Figura 58: Abaulamento de pistas.



Logo, para construir o forro em cima de uma base de hematita mole, é necessário realizar uma camada laterítica, para cobertura, de 0,80 m de altura.

Essa camada (Figura 59) proporciona impermeabilidade para a pista de rolamento, bem como apoia na proteção dos pneus dos equipamentos.

Figura 59: Cobertura de canga laterítica.



Para acessos que serão permanentes na mina, é premissa garantir a sustentação do piso.

Então, é recomendada a construção do acesso a partir de uma base de 2,0 m de rocha sã (Figura 60), o que evita “borrachudos”, ondulações e poças de água.

Acima dessa base, utiliza-se uma camada de 0,80 m de laterita. A laterita é usada por oportunidade, ou seja, por possuir grande quantidade no entorno da mina. O maior problema da utilização da laterita é sua composição de grande quantidade de óxidos de ferro e de alumínio, apresentando também materiais umedecidos.

Figura 60: Acesso construído em depósitos de estéril com base em rocha sã.



No caso de pistas no interior da mina que possuem rochas máficas decompostas, é necessário que se construa uma camada mínima de 1,0 m de rocha máfica sã, para garantir a sustentação mecânica da pista.

Acima (Figura 61), é necessário realizar uma camada de canga para proteção dos pneus.

Figura 61: Acesso construído em pistas no interior da mina com base em rocha sã.



No caso das pistas construídas sobre rocha máfica sã ou jaspelito (Figura 62), é necessário construir uma camada de 0,50 m de laterita para proteger os pneus contra cortes, reduzindo também as resistências ao rolamento.

Essa prática contribui para regularização da superfície e impermeabilização da pista.

Figura 62: Acesso construído sobre rocha máfica sã com revestimento laterítico.



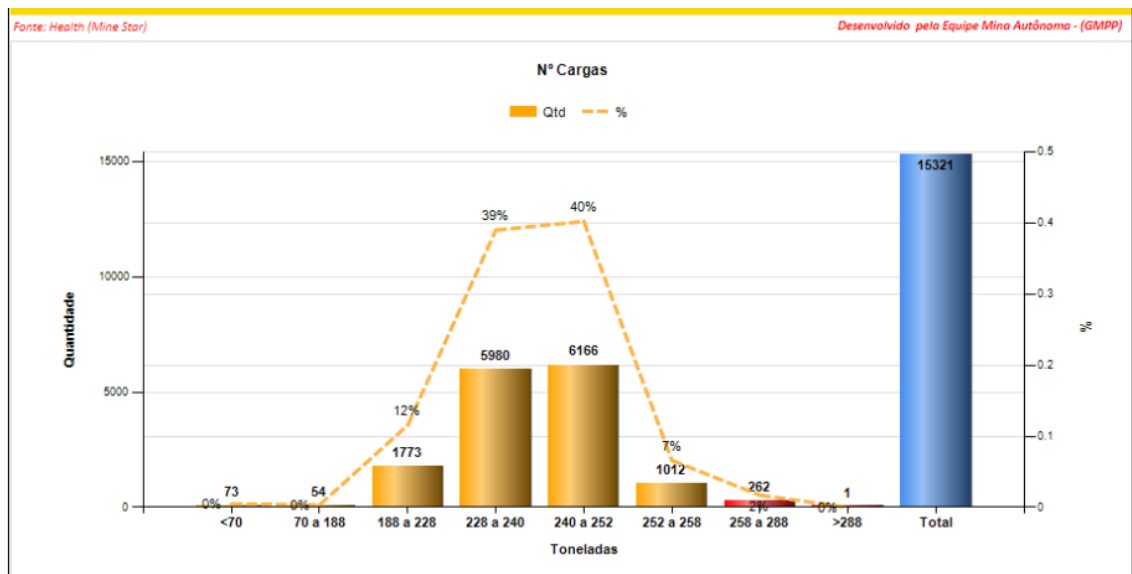
Após essas conformações realizadas, as áreas em questão são verificadas se os trabalhos estão sendo efetivos através dos resultados apresentados pela ferramenta RAC.

Capítulo 4

4. Resultados

Os esforços transmitidos aos caminhões, uma vez expostos a condições de vias defeituosas, demonstram que há forte impacto na vida útil de seus componentes. Para um caminhão da série 793, 90% da carga movida não pode exceder 110% da carga útil do ativo e nenhuma pode atingir 120%, de acordo com Figura 63:

Figura 63: Valores médios de payloads da frota de caminhões 793.

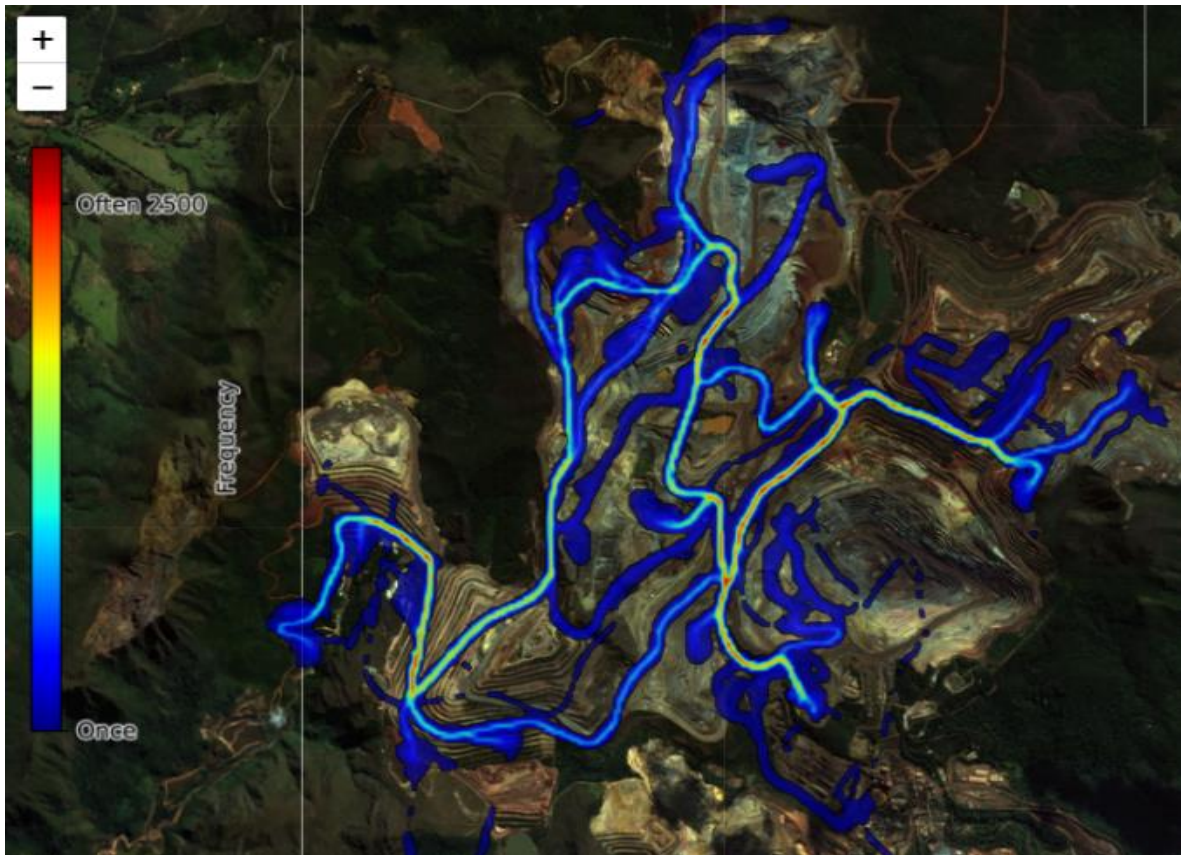


Nos sistemas de suspensão dos ativos, existem dois níveis diferentes de aviso de eventos RAC que alertam o operador por meio do visor da cabine e central de controle, o qual identifica os locais nas estradas onde há defeito.

Por parte do operador, é importante evitar essas áreas que desencadeiam os eventos ou reduzir sua velocidade. Uma vez detectada a área, equipamentos de infraestrutura são descolados ao local para conformação de pista.

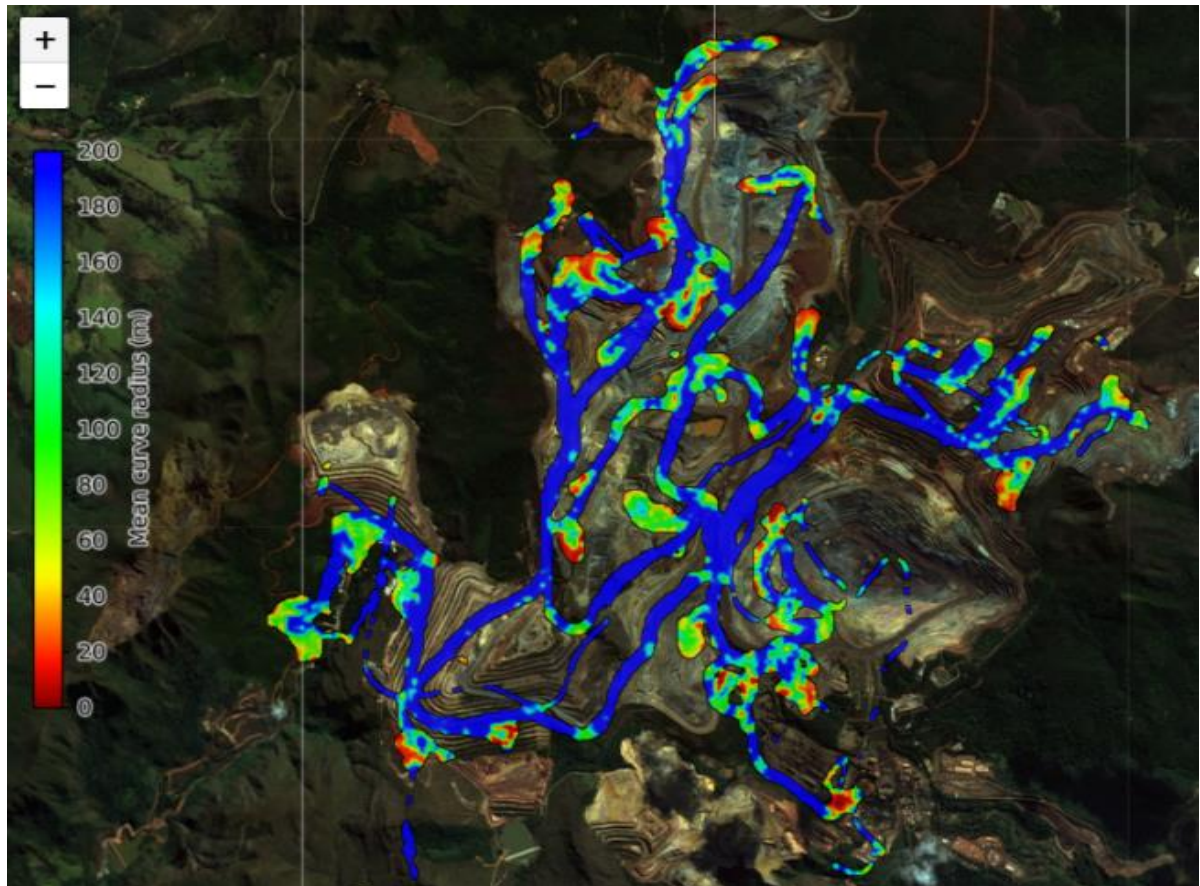
Um mapa de frequência do uso de vias, retirado do sistema VIMS, demonstra o nível de uso das vias com maior presença derivada da geolocalização, informando as pistas com mais índice de desgaste. O mapa de calor pode ser analisado na Figura 64:

Figura 64: Mapa de frequência de movimentação de ativos.



Os raios de curvas (Figura 65) apresentam locais onde há um esforço elevado do ativo, apresentando elevada criticidade para seus componentes. Entre esses locais, estão acessos, depósitos, praças de carregamento e curvas fechadas.

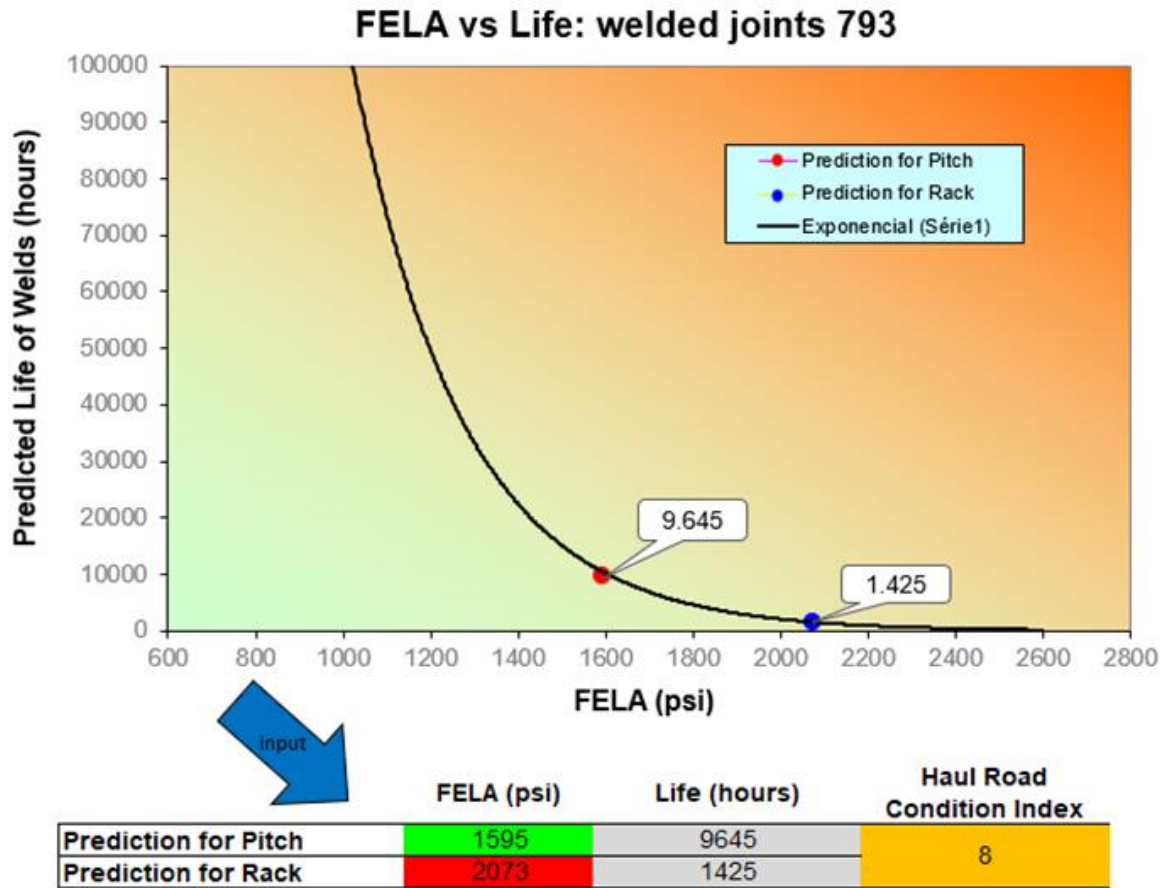
Figura 65: Mapa de movimentação de ativos apontando locais críticos de raio de curvatura.



O FELA permite que o gerenciamento identifique a gravidade e as condições da estrada de referência.

Na Figura 66, pode-se avaliar os valores médios de *rack* e *pitch* referentes ao mês de maio/2022.

Figura 66: Gráfico que apresenta os dados FELA.



A análise da frota engloba um total de 7 caminhões monitorados, correspondendo a um espaço amostral de 10% do valor da frota. Logo, as horas de vida estimam em quanto tempo de operação aparecerão falhas na estrutura dos ativos, nos sistemas de suspensão e nas rodas. Assim, a cada 1.425 horas, em média, ocorre uma falha de *rack*, e a cada 9.645 horas, uma falha de *pitch*.

Dessa forma, os índices de carga útil são obtidos pelo *payload* da frota, sendo esse valor a média de todos os veículos que a compõem. A classificação do índice de severidade da mina demonstra a relação entre índices de carga e índices de condições das vias.

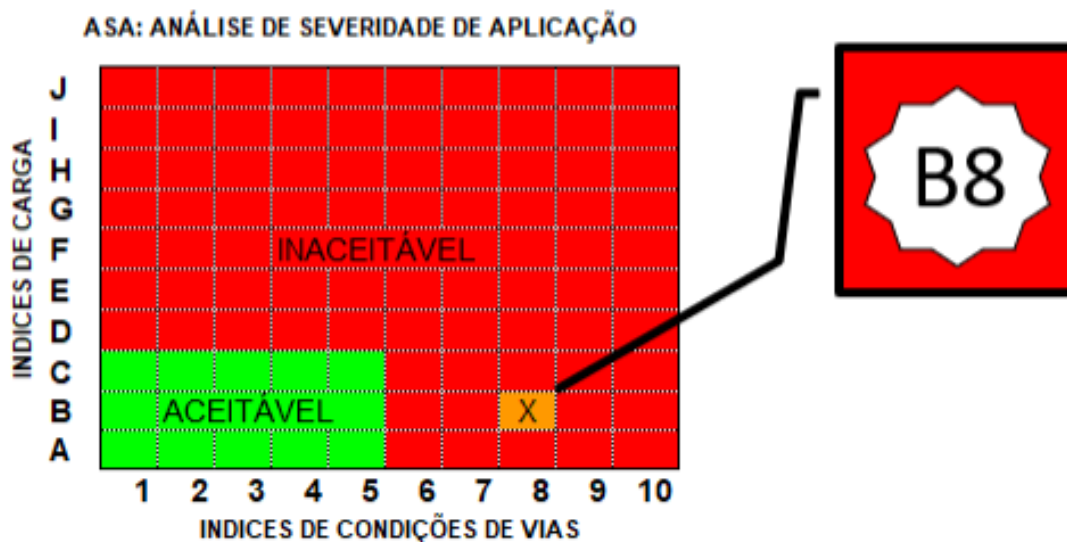
Avaliando a condição atual (retomando a Figura 63), 95% das cargas estão menores que 110% da carga útil e nenhuma carga acima de 120%; assim, a classificação do índice é B (Figura 67).

Analisando o valor do índice de conformação da pista – valor 8 – e a classificação do índice de carga útil – definido como B –, tem-se a classificação do índice de severidade

da mina igual a B8. A correlação desses valores supracitados pode ser observada na Figura 67 e a Figura 68:

Figura 67: Análise da classificação de uso de carga útil e índice de severidade da mina.

Índices de carga útil	
A	100% das cargas menor que 110% da carga útil
X B	95% das cargas menor que 110% da carga útil e nenhuma acima de 120%
C	90% das cargas menor que 110% da carga útil e nenhuma acima de 120%
D	85% das cargas menor que 110% da carga útil e nenhuma acima de 120%
E	80% das cargas menor que 110% da carga útil e até 2% acima de 120%
F	75% das cargas menor que 110% da carga útil e até 5% acima de 120%
G	70% das cargas menor que 110% da carga útil e até 10% acima de 120%
H	65% das cargas menor que 110% da carga útil e até 15% acima de 120%
I	60% das cargas menor que 110% da carga útil e até 20% acima de 120%
J	55% das cargas menor que 110% da carga útil e 20% ou mais acima de 120%



Conforme a Figura 68, analisando os valores de *pitch*, percebem-se valores aceitáveis, considerando o período chuvoso, em que houve uma queda (entre janeiro/22 e abril/22), retornando a um valor adequado no mês de maio/22. O valor do ASA variou de 8 a 9 nos últimos meses, demonstrando os problemas de acessos.

Figura 68: Valores mensais de controle de rack e pitch.

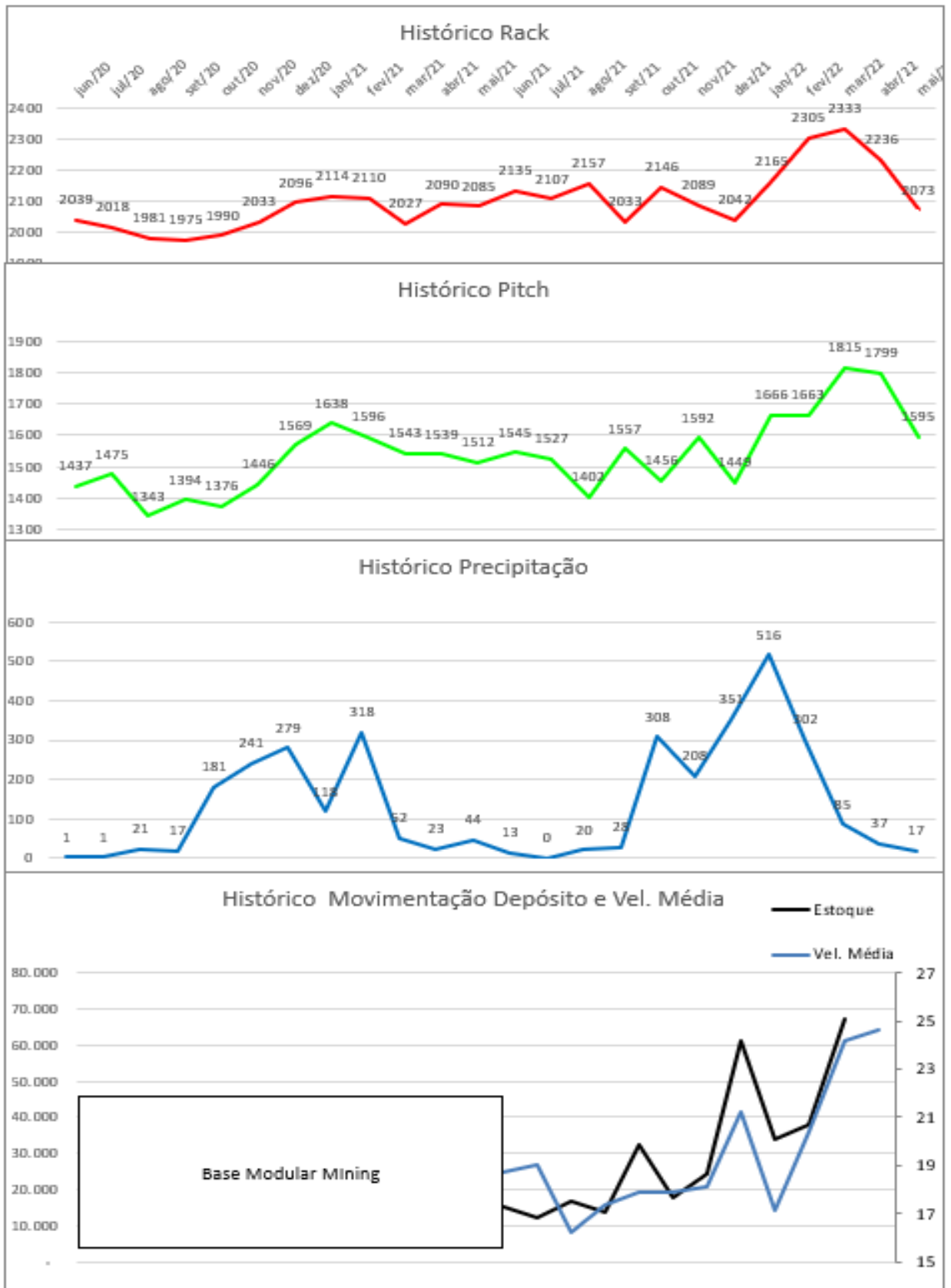
Histórico Mensal 2020 a 2022							
Vel. Média	Data	RACK	Hours	PITCH	Hours	ASA	Chuva (mm)
Base Modular	jun/20	2039	1633	1437	18147	8	1
	jul/20	2018	1773	1475	15588	8	1
	ago/20	1981	2060	1343	26430	7	21
	set/20	1975	2111	1394	21552	7	17
	out/20	1990	1989	1376	23161	7	181
	nov/20	2033	1676	1446	17505	8	241
	dez/20	2096	1300	1569	10703	8	279
	jan/21	2114	1209	1638	8121	8	118
	fev/21	2110	1228	1596	9607	8	318
	mar/21	2027	1712	1543	11876	8	52
	abr/21	2090	1332	1539	12053	8	23
	mai/21	2085	1361	1512	13443	8	44
18,7	jun/21	2135	1111	1545	11781	8	13
19,0	jul/21	2107	1244	1527	12661	8	0
16,2	ago/21	2157	1019	1402	20874	8	20
17,4	set/21	2033	1673	1557	11229	8	28
17,9	out/21	2146	1064	1456	16819	8	308
17,9	nov/21	2089	1337	1592	9762	8	208
18,1	dez/21	2042	1614	1449	17296	8	351
21,2	jan/22	2165	987	1666	7261	8	516
17,2	fev/22	2305	564	1663	7348	9	302
20,4	mar/22	2333	504	1815	4001	9	85
24,2	abr/22	2236	743	1799	4274	8	37
24,6	mai/22	2073	1425	1595	9645	8	17

Desde março/22, está sendo feito um trabalho dedicado à melhoria das condições das vias, com reuniões de alinhamento entre as partes interessadas, que colaboraram para um trabalho em conjunto.

Desses encontros, com princípio de trabalho baseado na metodologia PDCA e aplicação da melhoria contínua de processos, as equipes de planejamento, operação, infraestrutura de mina, engenharia, manutenção e telemetria definiram como meta o retorno a valores já então obtidos no histórico de medição igual a B7.

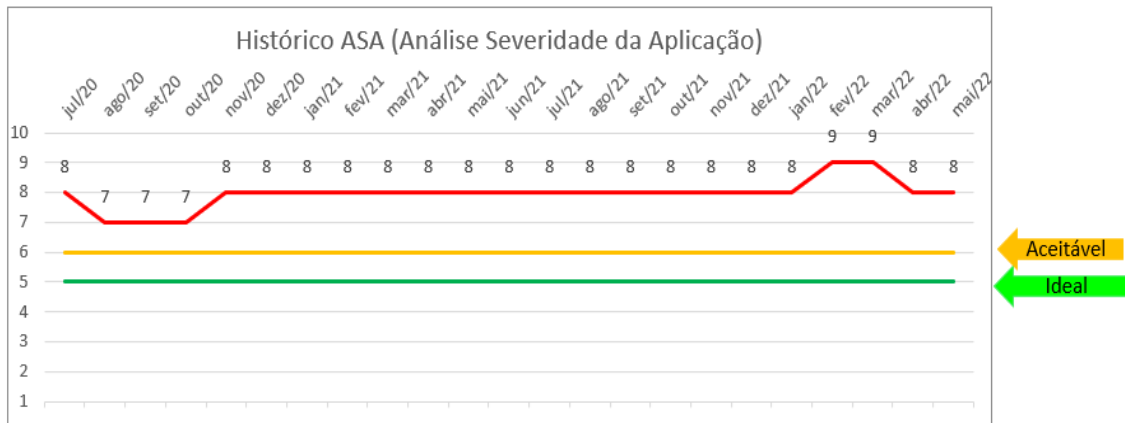
Na análise de precipitação (Figura 69), pode-se perceber que, após março, houve uma redução considerável das chuvas, o que colaborou para maior efetividade dos trabalhos de manutenção de vias.

Figura 69: Valores de históricos mensais.



A Análise de Severidade da Aplicação (ASA) apresenta o valor 6 como aceitável e o valor 5 como ideal. Atualmente, o valor 8 demonstra uma melhoria considerável comparado aos valores de fevereiro e março de 2022. A ASA (Figura 70) é obtida do valor do índice de conformação de pista.

Figura 70: Análise de Severidade de Aplicação (ASA) – histórico.



Nas Figuras 71, 72 e 73, pode-se analisar o relatório quantitativo de eventos/horas trabalhadas de *rack*, *pitch* e *bias* retirado do sistema HEALTH.

Contabilizam-se as quantidades de eventos por hora e o número de eventos ocorridos mensal (janeiro a maio) e semanalmente.

Em janeiro e fevereiro, os valores foram muito abaixo da média, o que se explica pelo período chuvoso, que impactou muito a produção e o deslocamento dos ativos na mina.

Analisando o mês de maio, entre a primeira e segunda semanas, houve uma redução dos eventos. Isso se deve ao fato de as melhorias de acesso estarem em andamento.

Figura 71: Quantidade de eventos por hora e número de eventos de rack.

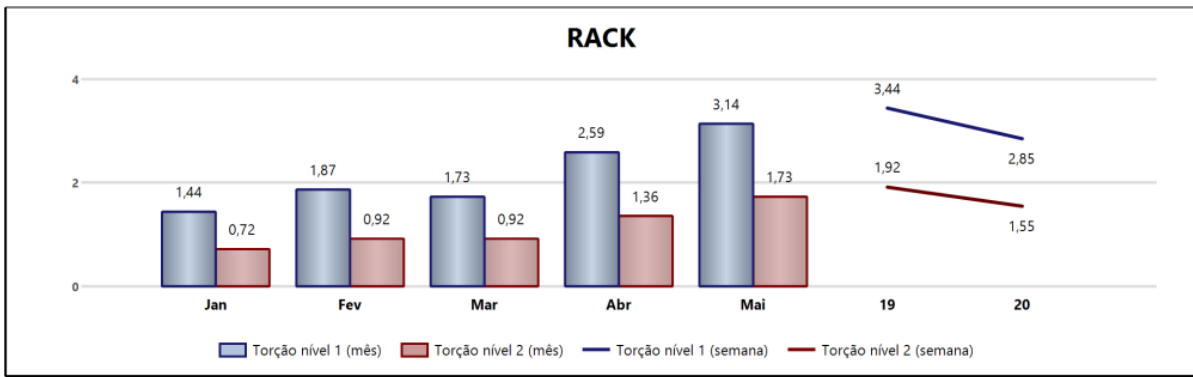


Figura 72: Quantidade de eventos por hora e número de eventos de pitch.

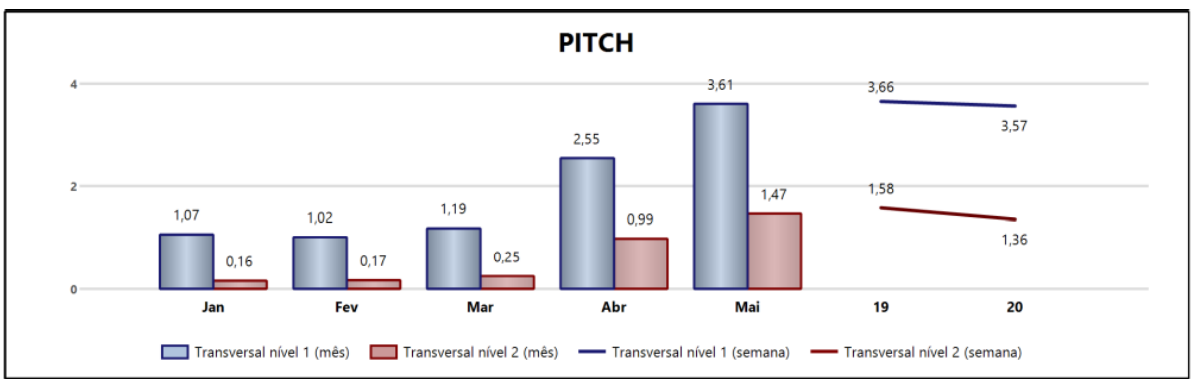


Figura 73: Quantidade de eventos por hora e número de eventos de bias.

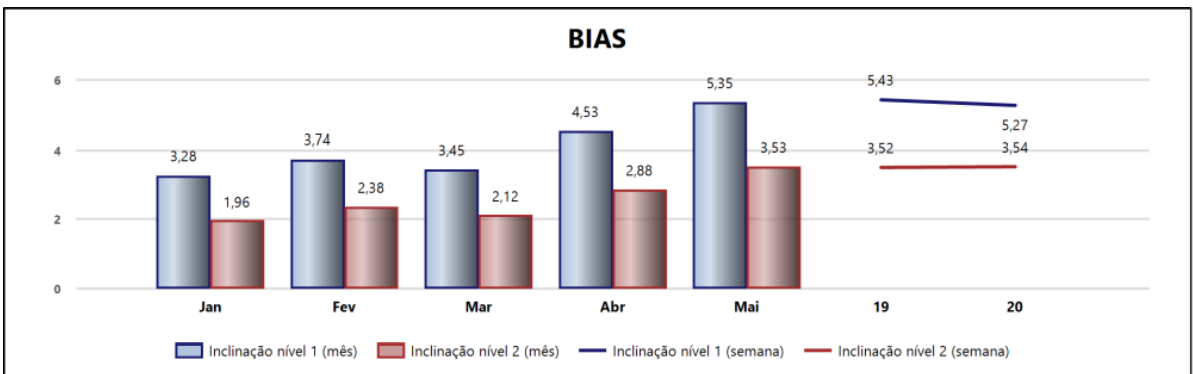


Figura 74: Quantidade de eventos por hora e número de eventos de RAC por ativo.

Eqto	Rack		Pitch		Bias	
CM7920	0,61	84	0,04	5	1,92	264
CM7954	0,40	50	0,06	8	2,00	251
CM7927	0,37	55	0,06	9	1,48	221
CM7923	0,35	67	0,05	9	1,35	261
CM7921	0,26	47	0,08	14	0,70	126
CM7925	0,21	27	0,00	0	0,84	110
CM7922	0,12	1	0,12	1	0,12	1
CM7926	0,05	6	0,00	0	0,21	26

As Figuras 75 e 76 apontam os ganhos obtidos na manutenção de vias e na conformação de acessos realizadas entre os meses de março e maio de 2022.

Essa análise pode ser realizada pelo comparativo entre os gráficos, lado a lado, verificando volume e concentração dos eventos críticos e suas localizações, sendo confirmados pelos valores quantificados na Figura 74.

Figura 75: Mapa RAC comparativo de praças de carregamento e acessos da mina.

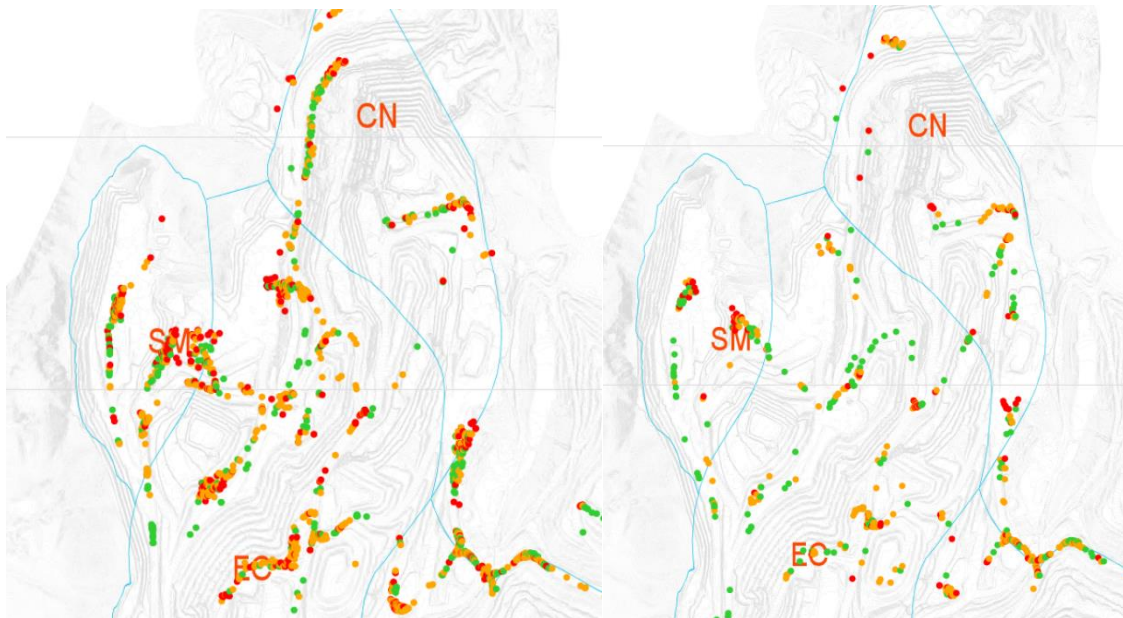
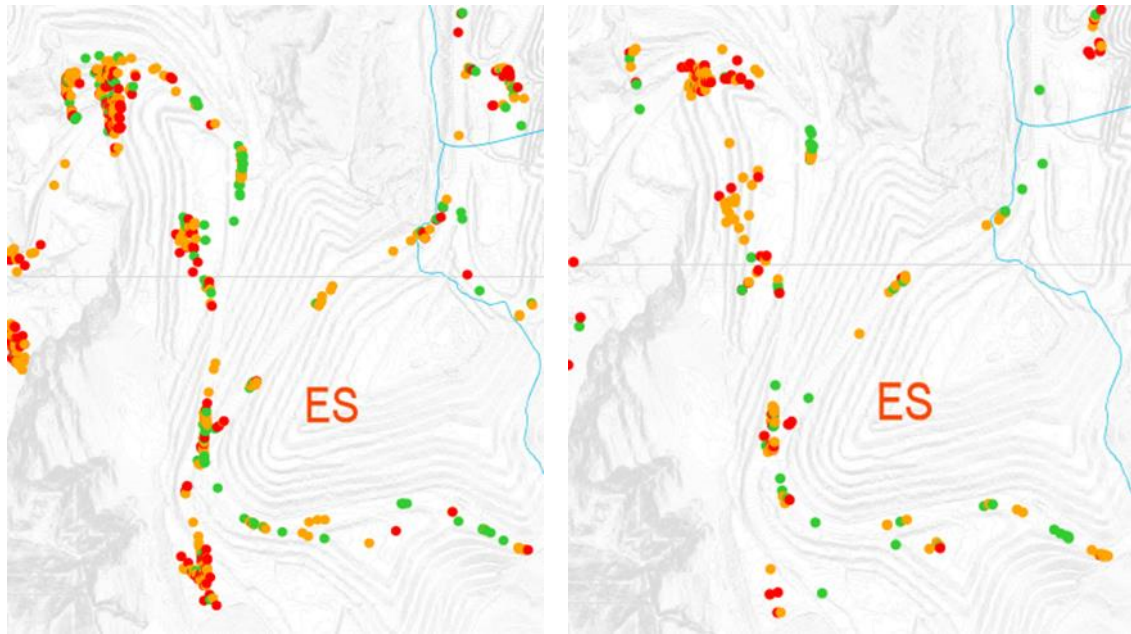
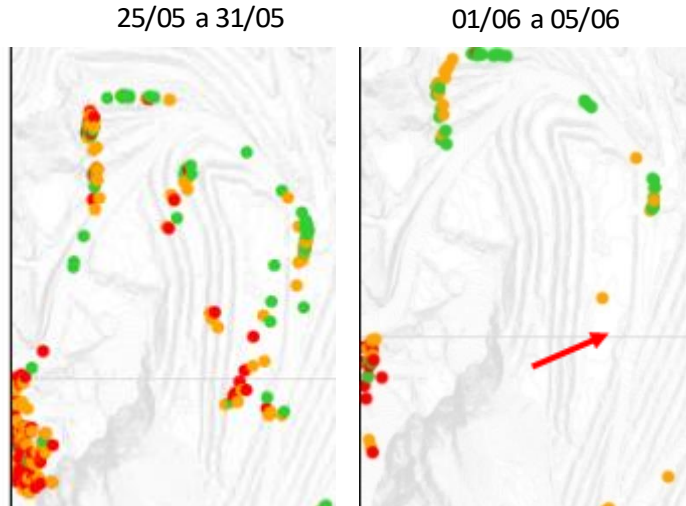


Figura 76: Mapa RAC comparativo de área de depósitos e acessos da mina.



Na Figura 77 percebe-se uma redução na quantidade de eventos RAC na região em análise.

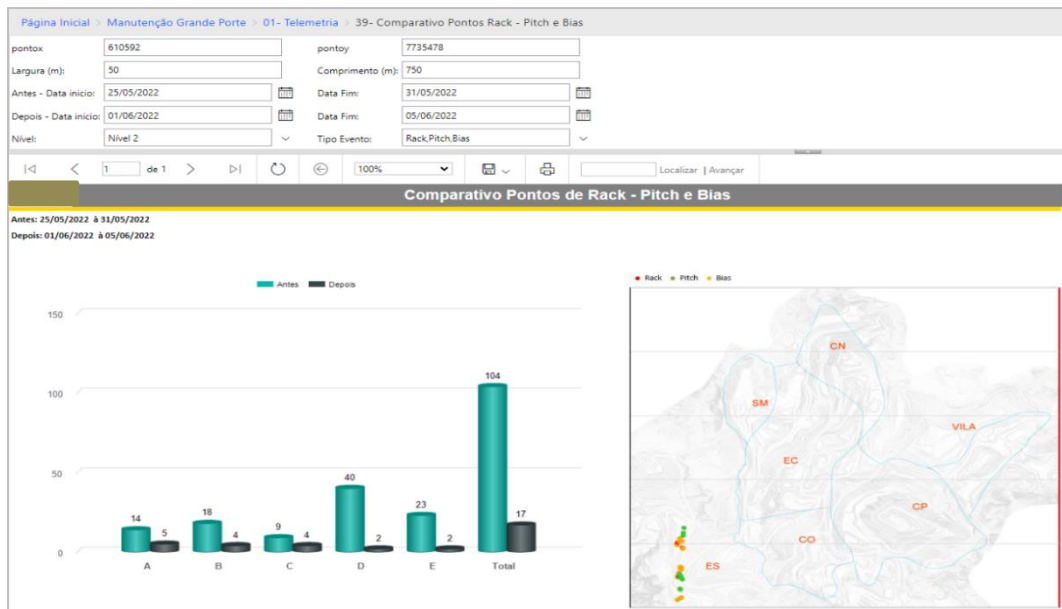
Figura 77: Comparativo de mapa de calor de eventos RAC.



Na Figura 78 foi realizada a análise comparativa entre o número de eventos no período 25/05 a 31/05 (Antes) e o período 01/06 a 05/06 (Depois). Conforme solicitado pela equipe de operação de mina/infraestrutura, foi desenvolvida a ferramenta de quantificação do número de eventos RAC para demonstrar a efetividade das ações que foram tomadas para correção.

Salientou-se a necessidade do uso frequente da ferramenta e, principalmente, o retorno das tratativas tomadas para redução do número de eventos, conforme mostra a Figura 72. Um total de 104 eventos foi reduzido para 17, na região em questão.

Figura 78: Ferramenta quantitativa de eventos RAC.



Na Figura 79 pode-se identificar quais equipamentos estão localizados nas praças de carregamento e tráfego pelos acessos. Essa ferramenta da Cat Minestar proporciona uma identificação das atividades que estão ocorrendo em tempo real.

Figura 79: Ferramenta CatMinestar que promove a identificação dos ativos na mina.



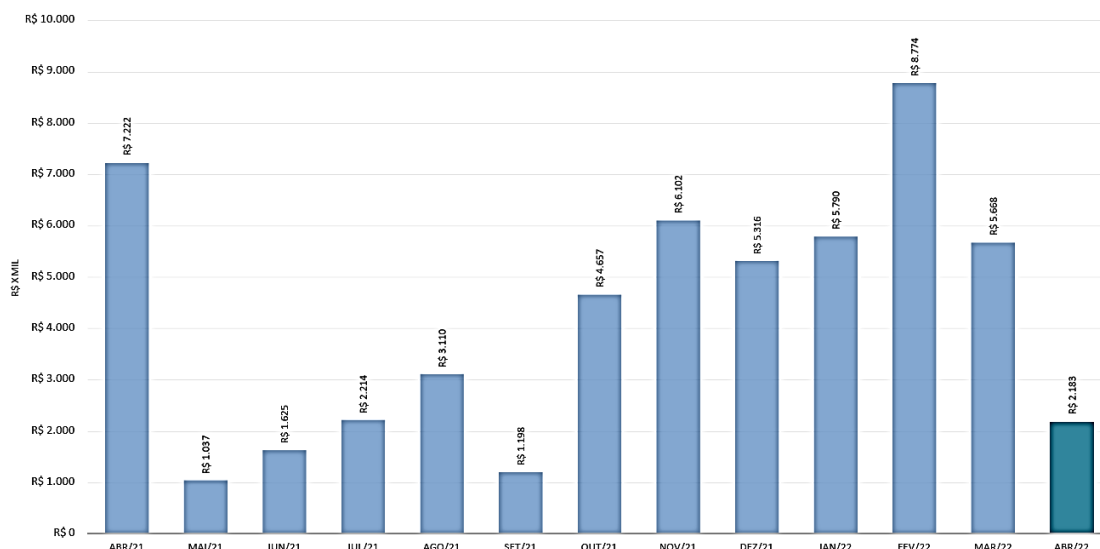
A Figura 80 apresenta a conformação realizada no acesso 10H como um exemplo das melhorias que estão sendo realizadas na mina em questão. Pode-se perceber que as leiras estão adequadas, de acordo com a NR-22. O acabamento do acesso foi realizado com itabirito fino, e foi construído de acordo com a metodologia de construção de vias.

Figura 80: Acesso 10H adequado e conformado com itabirito fino.



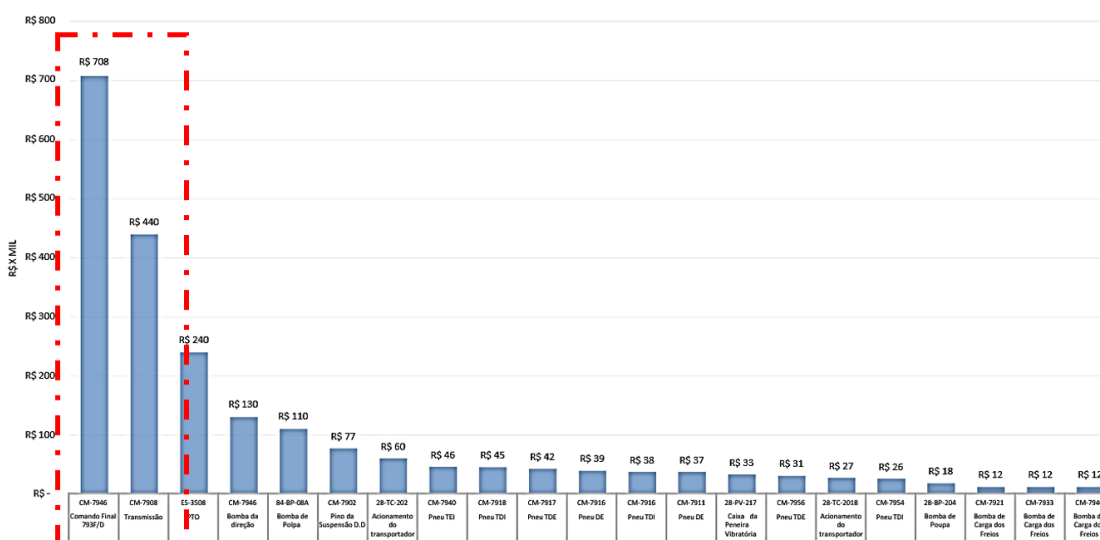
A equipe de manutenção realiza medições mensais de *saving*, ou seja, custos evitados por intervenção da equipe do Centro de Monitoramento de Condições. Os valores de *saving* estão apresentados na Figura 81, com um intervalo de tempo entre abril/2021 a abril/2022:

Figura 81: Savings mensais 2021/2022.



Na Figura 82 são apresentados os *savings* por ativos e por tipo de modo de falha que poderia ter afetado o ativo se não fosse a atuação da equipe de Centro de Monitoramento de Condições. As principais falhas relacionadas a acessos irregulares foram marcadas em vermelho e, apontam grande custo que foi evitado:

Figura 82: Principais *savings* abril/2022.



No *dashboard* apresentado na Figura 83 são apresentados os valores de perdas evitadas pelo monitoramento contínuo de vias realizado pela Telemetria de jan/2022 a abril/2022. São apresentados também os dados de quantidade de análise de telemetria por mês, as intervenções realizadas às frotas para garantir a aderência de comunicação entre os ativos e o sistema de recepção e análise dos dados:

Figura 83: Dashboard telemetria a bril/2022.



Capítulo 5

5. Conclusões

A aplicação de ferramentas para análise de desempenho de vias mostrou-se uma alternativa eficaz no gerenciamento das frotas e dos custos operacionais. A ferramenta RAC apontou os principais problemas existentes atualmente nas vias de mina e também demonstrou a classificação atual dos acessos da mineração em questão. Os resultados desse estudo apontam maneiras de atuar no processo com intuito de reduzir as perdas geradas por manutenções corretivas nos ativos. O método então fornece uma contribuição importante ao empreendimento mineiro, demonstrando através de ferramentas qualitativas e quantitativas onde é preciso atuar para obter melhorias nas vias. Uma vez que as organizações buscam redução de custos em suas operações, o RAC representa uma forma de atuação preventiva nas vias para que sejam evitadas mais perdas no processo.

A tecnologia de bordo foi validada através dos resultados obtidos, atingindo assim o principal o objetivo do trabalho, uma vez que demonstra os *savings* gerados pelo monitoramento contínuo das vias através dos sensores instalados nos caminhões que se comunicam diretamente com o supervisor da Telemetria em tempo real. Esse método se torna ainda mais rentável, uma vez que são utilizados recursos já disponíveis e não são necessários grandes investimentos.

Entre os resultados obtidos está a redução de eventos de RAC de 104 para 17 em um curto período de tempo, 25/05/2022 a 31/05/2022, demonstrando que o trabalho de manutenção de vias contínuo é o caminho certo para redução de custos com manutenção de ativos. Avaliando os *savings* mensais, entre 2021 a 2022, são contabilizados valores que passam da casa de milhões por análise preventiva do Centro de Monitoramento de Condições/Telemetria, sendo a maior perda evitada nesse período R\$8,8 milhões de reais. O demonstrativo em valores justifica todo o trabalho de monitoramento em tempo real e inspeções realizadas diariamente. Esse ganho demonstra também o quanto o sistema de gerenciamento de frotas atua de forma eficaz para que sejam alcançados resultados como esses. Outro ponto que é importante destacar é que em abril/2022 os maiores *savings* obtidos foram nos sistemas de comando final e transmissão nos caminhões, sistemas os

quais são muito afetados quando as condições de vias estão desfavoráveis, o que corresponde em valores em R\$708 mil e R\$440 mil reais, respectivamente.

O monitoramento da telemetria é um poderoso artifício que o empreendimento mineiro possui no quesito redução de custos, apontando nesse estudo uma economia em 2022 de R\$8,85 mil reais. É necessário que o monitoramento seja expandido para toda a frota, a fim de obter um valor de acuracidade ainda melhor e mais confiável dos eventos recebidos através da tecnologia embarcada. Em adendo, é importante a realização de estudos posteriores para avaliar uma maneira de construir os acessos com os materiais adequados para que tenham vida útil prolongada, evitando assim, excessivos gastos com manutenção de estradas de mina.

Referências bibliográficas

AUSTRALIAN GOVERNMENT, (2010). Analyses of Diesel for Mine Haul and Transport Operations, A Case Study. Department of Resources, Energy and Tourism, Australia. <http://eex.gov.au/files/2014/06/Analyses-of-Diesel-Use-for-Mine-Haul-and-Transport-Operations.pdf> (accessed 02.07.15.).

BAUCOM, J. The evolution of mining trucks is changing interactions and productivity at mine sites, Perspectives RPMGlobal (2011). Disp: <https://www.rpmglobal.com/wp-content/uploads/mp/files/resources/files/rpmperspectives-2011-110.pdf>. Accessed: November 5, 2019.

BOZORGEBRAHIMI, E., Hall, R.A., Blackwell, G.H., 2003. Sizing equipment for open pit mining e a review of critical parameters. Min. Technol. 112, A171eA179.

CATERPILLAR ESPECIFICAÇÕES. Specs Catalog for 777D Off-Highway Truck, AEHQ5855. Disponível em:< <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C229910>> Acesso em: 02/04/2016.

CATERPILLAR. Reference guide to mining machine applications. Peoria: 2009. Field Guide Number AEXQ0030-02. Disponível em: < http://www.academia.edu/8475044/AEXQ0030-02-2009Mining_Ref_Guide_App-compress> Acesso em: 06/03/2016.

CATERPILLAR® Haul Road Design and Management, (2006). Pete Holman; Big Iron University, St. Charles, IL.

CEBON, D. Manual de interação de veículos rodoviários. Lisse: doces e Zeitlinger; (1999).

CURRY, J.A., Ismay, M.J.L., Jameson, G.J., (2014). Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding. Min. Eng. 56, 70e80.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Manual de projeto geométrico de rodovias rurais. Rio de Janeiro: DNER, 1999. 195p.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Manual de pavimentação. 3.ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274p.

DOE, (2007). Estudo de largura de banda de energia da indústria de mineração, preparado pela BCS International, Programa de Tecnologias. Industriais (2007). Disponível em https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/mining_bandwidth.pdf.

ELS, PS. Die hitteprobleem op hidropneumatiese veer-en-demperstelsels. [The heat problem on hydro-pneumatic spring and damper systems]. Master's dissertation. Pretoria: University of Pretoria; (1993).

FREITAS, S. (2015). Planejamento estocástico de lavra: metodologias de simulação, otimização e gestão de risco para a mina do futuro. pp. 181.

GOMES, R.B., DE TOMI, G., ASSIS, P.S., 2015. Impact of quality of iron ore lumps on sustainability of mining operations in the Quadrilátero Ferrífero area. Min. Eng. 70, 201e206.

HOLMES, (2019). F. Holmes, os 10 principais países produtores de ouro - investidores globais dos EUA, Frank Talk, um CEO Blog de Frank Holmes (2019). Disponível em <http://www.usfunds.com/investor-library/frank-talk/top-10-gold-producing>.

HUGO D. et al., (2008). Haul road defect identification using measured truck response/ Journal of Terramechanics 45; 79–88.

HUGO, D. Haul road defect identification and condition assessment using measured truck response. (2005) 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria, Pretoria.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M. Open pit mine planning and design. Fundamentals Rotterdam: A. A. Balkema, 2013. 1308.

KANSAKE, B.A. and FRIMPONG S., (2018). Analytical modelling of dump truck tire dynamic response to haul road surfasse excitations, *Int. J. Mining, Reclam. Environ.* pp. 1–18. doi:10.1080/17480930.2018.1507608.

KANSAKE, B. A., SAMUEL FRIMPONG, S., ALI, D. (2019): Multibody dynamic model of ultra-large dump truck-haul road interactions into haul road design integration, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, DOI: 10.1080/17480930.2019.1692414.

KLAFKE, B.; RESENDE, G.; FREITAS, G.; BIANCHI, A. G. C.; PESSIN, G.; (2019). Sistema para detecção de estradas e obstáculos baseado em imagens RGB e nuvem de pontos para equipamentos de mineração. Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto, MG, Brasil. DOI: 10.17648/sbai-2019-111409.

LEVESQUE, M., MILLAR, D., PARASZCZAC, J., (2014). Energia e mineração e as verdades domésticas. *J. Limpo. Produtos.* 84, 233e255.

MACEDO, E. Noções de topografia para projetos rodoviários. 2017. Disponível em: <<http://www.topografiageral.com/Curso/capitulo%2014.php>> Acesso em: 5 de abril de 2016.

MARAIS, W.J., THOMPSON, R.J., and VISSER, A.T. (2008). Using mine truck on-board data as a decision making tool for mine road maintenance management. *Proceedings of the 7th International Conference on Managing Pavement Assets*, Calgary, Canada, 25-28 June. 2008. Paper 6–18.

MONTEIRO, H. P. S. V. (2021). Influência do estado de conservação das vias de acesso nos indicadores de custo e produtividade de caminhões na mineração Aricá. / Hugo Pires de Souza Venturato Monteiro. -- Cuiabá, MT.

MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C., 2007. *Applied Statistics and Probability for Engineers*, fourth ed. John Wiley & Sons, Phoenix.

MOTLOGELWA, O.G., MINNITT, R.C.A., 2013. Optimization of diesel usage at uitvlagt mine. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 113 (4), 345e349.

NMA, Fatos sobre carvão e minerais, (2016). Disponível em <https://nma.org/wp-content/uploads/2016/11/factbook2016-3.pdf>. Acesso: 5 de novembro de 2019.

OSKOU EI, M.A., AWUAH-OFFEI, K., 2014. Statistical methods for evaluating the effect of operators on energy efficiency of mining machines. Min. Technol. 123 (4), 175e182.

PELLISSARI, F. P. (2019) Projeto de Estradas para Mineração – Caracterização e Análise de Aplicações Práticas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL Porto Alegre.

PERONI, R. L.; VISSER, A. Haul road structural, functional and management considerations.2015.17p.

RICHARDSON, S. and McIVER, J., (2015) "Improving Mine Haul Road Roughness to Reduce Haul Truck Fuel Consumption," SAE Technical Paper 2015-01-0050, doi:10.4271/2015-01-0050.

RODOVALHO, E. C.; LIMA, H. M.; TOMIC, G. (2016). New approach for reduction of diesel consumption by comparing different mining haulage configurations. Journal of Environmental Management 172 (2016) 177e185. Institute of Science and Technology, Federal University of Alfenas, Brazil. © Elsevier Ltd.

SHAFIEE, S., TOPAL, E., (2012). Nova abordagem para estimar os custos totais de mineração em superfície Minas de carvão. Min. Technol. 121 (3), 109e116.

SOARES DE SOUSA, L. M.; LOPES DE OLIVEIRA FILHO, W.; MOTA DE LIMA, H. Dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto. Revista Escola de Minas, vol. 65, núm. 2, p. 279-284, 2012.

SOUSA, L. Estudos de dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto, (2011). 15f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação, Universidade Federal de Ouro Preto. 2011.

THOMPSON, R.J. and VISSER, A.T. (2003). Mine haul road maintenance management systems. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 103, no. 5. pp. 303–312.

THOMPSON RJ, VISSER AT, MILLER RE, LOWE T. (2003). O desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de manutenção de estradas de mina em tempo real usando caminhão de transporte e análise de assinatura de vibração da estrada. In: Oitava conferência internacional sobre estradas de baixo volume, Nevada.

THOMPSON, R.J., VISSER, A.T., (2006). Selection and maintenance of mine haul road wearing course materials. *Min. Technol.* 115 (4), 140e153.

THOMPSON, R.; VISSER, A. Mine Haul Road Design, Construction and Maintenance Management, course notes given on May 2014 at Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

THOMPSON, R.J., (2015). Principles of mine haul road design and construction, in Course Notes, 2015, pp. 156.

USGS, resumos de commodities minerais (2019). Disponível em https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf. Acesso: 5 de novembro de 2019.

VIERA, J. Determinação e quantificação de elementos de relevância em infraestrutura de mina. 2013. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2013.

VISSER, A. T. (2015) Haul roads can make money. *The Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Vol. 115. November, 2015. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n11a2>.