

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

DOUGLAS ALEXANDRE GONÇALVES ALEGRE

ANÁLISE DE IMPACTO DO PROJETO GEOMÉTRICO E RESISTÊNCIA AO  
ROLAMENTO DE ESTRADAS EM MINERAÇÃO A CÉU ABERTO

Porto Alegre – RS  
2021

DOUGLAS ALEXANDRE GONÇALVES ALEGRE

ANÁLISE DE IMPACTO DO PROJETO GEOMÉTRICO E RESISTÊNCIA AO  
ROLAMENTO DE ESTRADAS EM MINERAÇÃO A CÉU ABERTO

Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Porto Alegre - RS  
2021

DOUGLAS ALEXANDRE GONÇALVES ALEGRE

ANÁLISE DE IMPACTO DO PROJETO GEOMÉTRICO E RESISTÊNCIA AO  
ROLAMENTO DE ESTRADAS EM MINERAÇÃO A CÉU ABERTO

Dissertação defendida e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

---

**Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni**  
Orientador – DEMIN/UFRGS

---

**Prof. Dr. Alex T. Visser**  
University of Pretoria

---

**Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski**  
DEMIN/UFRGS

---

**Dr. Luciano Nunes Capponi**  
Mosaic Fertilizantes

Dedico este trabalho à minha família, por sempre me guiarem pelo caminho certo e por serem a minha estrutura mais forte. Amo vocês, xmadvf.

## **AGRADECIMENTOS**

Esta dissertação de mestrado contou com o apoio de muitas pessoas, e a elas gostaria de agradecer imensamente. Foi um período de muito aprendizado e de imensa satisfação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino público de qualidade na minha formação, desde o Colégio de Aplicação, passando pela graduação em Engenharia de Minas e o mestrado em Engenharia pelo PPGE3M.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – pela bolsa concedida no período inicial do mestrado.

Aos amigos, colegas, bolsistas de iniciação científica e professores do LPM – Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro, que me auxiliaram no desenvolvimento do meu trabalho, além das valiosas discussões e colaborações. Um agradecimento especial aos colegas Eduardo Aquino e Felipe Dille pela parceria e ajuda com os artigos apresentados nesta dissertação.

À empresa Anglo American, por fornecer os dados utilizados em um dos artigos apresentados.

Aos colegas e gestores da Datamine Software, que me incentivaram para que eu pudesse concluir este trabalho fornecendo as soluções necessárias para as metodologias desenvolvidas.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Peroni, pela orientação, confiança, amizade e dedicação durante todas as etapas da graduação e pós-graduação.

Por último, e não menos importante, obrigado família por acreditarem em mim em todos os momentos. Obrigado meu amor, Marília, pela vida compartilhada e por me apoiar em tudo.

## RESUMO

Em empreendimentos de mineração, as estradas desempenham um papel essencial, tendo em vista que toda a produção, em sua maioria, é transportada por caminhões que utilizam esses acessos para sua circulação. Sua importância também é evidenciada pelo ponto de vista econômico, pois estão diretamente relacionadas à eficiência operacional dos caminhões e, conseqüentemente, aos custos de lavra. Nesse contexto, é essencial que o projeto de estradas e seus aspectos construtivos (projetos geométrico, estrutural e funcional) e seus sistemas de gerenciamento de manutenção sejam aprimorados e otimizados sempre que possível. O presente trabalho é composto por 2 artigos publicados nos periódicos internacionais *REM – International Engineering Journal* e *Mining Technology (TIMM A)*. O primeiro artigo analisou os impactos na relação estéril-minério (REM) quando variados parâmetros geométricos dos acessos em dois tipos de depósitos minerais: um com um comportamento mais verticalizado e outro mais horizontalizado. Os valores de relação estéril-minério e a sensibilidade a variações no ângulo de talude global foram comparados com um cenário de referência, onde os resultados evidenciaram o aumento da REM quando: (a) aumentada a largura das estradas; (b) diminuída a inclinação longitudinal; e (c) adicionados *switchbacks*. Também foi observado que as variações da REM são inversamente proporcionais às do ângulo global do talude. O segundo artigo apresentou um método para estimar a resistência ao rolamento das estradas de transporte considerando a inclinação longitudinal das vias e dados coletados a partir do sistema de despacho. A metodologia usou uma retro análise através de curvas de *Rimpull* e equações de estimativa de desempenho desenvolvidas por Cooper. O uso deste método é capaz de ajudar a identificar rapidamente setores com defeitos no pavimento permitindo avaliar a qualidade das estradas por meio de mapas de resistência ao rolamento, o que pode auxiliar as rotinas de manutenção em tempo real, reduzindo custos e aumentando o desempenho dos caminhões. A integração dos artigos tem como objetivo desenvolver avaliações e metodologias a serem aplicadas no âmbito das estradas de mina não pavimentadas, com foco no projeto geométrico, resistência ao rolamento, monitoramento e manutenção das vias, tanto em fase de projeto como em fase de operação.

**Palavras-chaves:** estradas de mineração; projeto geométrico; resistência ao rolamento; sistema de despacho; sistema de manutenção; curvas de Rimpull; relação estéril-minério.

## ABSTRACT

In mining projects, haul roads play an essential role considering that all production is normally hauled by trucks that use the haul roads for hauling. They are also important from an economic point of view, as they are directly related to the operational efficiency of the trucks and, consequently, to the mining costs. In this context, it is essential that the haul road design, its physical aspects (geometrical, structural, and functional design) and its maintenance management systems are improved and optimized whenever possible. The present study consists of 2 articles published in the international journals REM – International Engineering Journal, and Mining Technology (TIMM A). The first article analyzed the impact on the strip ratio (SR) when varying haul road geometric parameters in two types of mineral deposit: one with a steeper dip and a second one with a more horizontal behavior. The SRs and the overall slope angle were compared with a base-case scenario, where the results showed an increase of the SR when: (a) the width of the haul roads was increased; (b) the longitudinal inclination was decreased; and (c) switchbacks were added. It was also noticed that the SR variations are inversely proportional to the overall slope angle variations, playing an important role regarding the geometric design of the haul roads. The second article presented a method to estimate the rolling resistance of haul road segments considering the longitudinal grade of the roads crossed with dispatch system data. The methodology used a back-calculation from Rimpull curves and estimated performance equations developed by Cooper. The use of this method demonstrated that it could assist in quickly identifying issues on mine haul roads and assess road quality locally through rolling resistance estimated maps, which will help to improve maintenance routines and truck performance. The integration of the articles aims to develop evaluations and methodologies to be applied in the scope of mine haul roads, focusing on geometric design, rolling resistance, monitoring and maintenance of the roads, both in the design phase and in the operational phase.

**Keywords:** mining haul roads; geometric design; rolling resistance; dispatch system; maintenance system; Rimpull curves; strip ratio; haul road quality.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resistência ao rolamento ótima associada ao custo mínimo total. ....	15
Figura 2 - Elementos geométricos de estradas em mineração.....	25
Figura 3 - Design típico de uma estrada em mineração. ....	26
Figura 4 - Situações geométricas com diferentes cenários de segurança.....	29
Figura 5 - Seção típica de um pavimento flexível de estradas. ....	31
Figura 6 - Gráfico de curvas de CBR.....	33
Figura 7 - DCP ( <i>Dynamic Cone Penetrometer</i> ). ....	35
Figura 8 – Valores de CBR pela penetração do DCP.....	36
Figura 9 – Profundidade pelo CBR. ....	36
Figura 10 - Gráfico para seleção do material de revestimento .....	39
Figura 11 - Desenho esquemático de um pneu e parâmetros que afetam a resistência ao rolamento.....	40
Figura 12 - Relação entre resistência ao rolamento, produção e consumo de combustível. ....	42
Figura 13 – Ábaco para estimativa da resistência ao rolamento de acordo com velocidade de tráfego e pontuação obtida pela avaliação visual dos defeitos. ....	44
Figura 14 - Hierarquia dos sistemas de manutenção de estradas de mineração. ...	46
Figura 15 – Distribuição típica dos custos de lavra (250kt/dia e 500m de profundidade). ....	47
Figura 16 - Curvas de Rimpull de (a) propulsão e (b) retardo para um caminhão elétrico. ....	49

Figura 17 – Procedimento para leitura da velocidade de caminhões usando curvas de Rimpull.....	51
Figura 18 – Exemplo de registros do sistema de despacho plotados com a topografia de mina evidenciando suas velocidades instantâneas na sua localização.....	53
Figura 19 – Sistema de manutenção de estradas em tempo real (RT-MMS).....	55
Figura 20 – Defeitos de estradas reconstituídos comparados com geometria real da estrada.....	57
Figura 21 – Mapa de densidade dos defeitos em estradas de mineração (símbolos representam a magnitude do defeito).....	58
Figura 22 – Mapa de cores indicando qualidade das estradas, onde a escala de cores vai de verde (trechos adequados) até o vermelho (manutenção prioritária). .	59
Figura 23 – Mapa indicando resistência ao rolamento baixos e altos em estradas de mineração. Fonte: Joseph, Curley e Anand (2017) .....	60
Figura 24 – Estimativa da resistência ao rolamento com RT-MMS para diversos pontos de um trecho de estradas de mina.....	61
Figura 25 – Características de uma rede de estradas de mina utilizando modelo 3D. ....	62
Figura 26 - Interface inicial do Script para estimativa da resistência ao rolamento utilizando metodologia desenvolvida pelo artigo 2. ....	91
Figura 27 - Interface de cada seção do Script para estimativa da resistência ao rolamento utilizando metodologia desenvolvida pelo artigo 2.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de atrito tipicamente utilizados conforme natureza do pavimento.....	27
Tabela 2 - Superelevação recomendada para curvas horizontais.....	27
Tabela 3 - Categorias de estradas de mina.....	37
Tabela 4 - Valores limite de deformação vertical no pavimento em função da categoria da estrada.....	38
Tabela 5 – Estimativa da resistência ao rolamento em função da condição da estrada.....	41
Tabela 6 - Avaliações da resistência ao rolamento em revestimento.....	43

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1    Justificativa .....	16
1.2    Meta .....	17
1.3    Objetivos Específicos.....	17
1.4    Metodologia .....	18
1.5    Contribuição da Dissertação .....	20
1.6    Organização da Dissertação.....	20
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
2.1    Estradas de Mineração .....	22
2.2    Projeto Geométrico de Estradas .....	24
2.3    Projeto Estrutural de Estradas .....	30
2.4    Projeto Funcional de Estradas.....	38
2.5    Manutenção e Monitoramento de Estradas .....	44
<b>CAPÍTULO 3 - INTEGRAÇÃO DOS ARTIGOS</b> .....	<b>63</b>
3.1    Artigo 1 .....	63
3.2    Artigo 2 .....	64
3.3    Integração .....	65
<b>CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>87</b>
4.1    Conclusões .....	88
4.2    Recomendações e Trabalhos Futuros .....	90
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>93</b>

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

As estradas de mineração desempenham um papel significativo nas atividades mineiras, tendo em vista que toda a produção é normalmente transportada por caminhões que utilizam as vias para sua circulação. Elas também se mostram de suma importância se vistas do ponto de vista econômico, sendo elementos fundamentais da eficiência operacional dos caminhões, impactando diretamente nos custos de lavra. Nesse contexto, é essencial que o projeto de estradas e seus aspectos construtivos – projetos geométricos, estruturais e funcionais, sejam aprimorados e otimizados sempre que possível.

Aliado a um bom projeto, o constante monitoramento das estradas garante que ações corretivas possam ser devidamente planejadas a fim de garantir a adequada operação de lavra. Tais ações tem como objetivo principal o aumento da produtividade, diminuição do tempo de ciclo dos caminhões, redução dos custos de lavra e melhor alocação de recursos. Todos estes aspectos corroboram para a premissa de que as estradas possuem papel fundamental na valorização do empreendimento, seja do ponto de vista operacional ou do econômico e de segurança aos trabalhadores (THOMPSON; VISSER, 2003).

Em particular, o projeto geométrico garante que os caminhões percorram o trajeto mais curto possível, com a velocidade máxima e garantia de segurança dos trabalhos (THOMPSON, 2011). Em contrapartida, a geometria dos acessos possui reflexo direto no projeto de cava, sendo importante analisar de forma crítica a relação entre as estradas e a relação estéril-minério (REM). Esse parâmetro é essencial no planejamento de lavra a céu aberto, pois é um dos meios de descrever a eficiência geométrica da operação, tornando evidente a relação de dependência da REM com as estradas da mina seu papel fundamental no ganho financeiro do empreendimento (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013).

De acordo com Sullivan (2006), a variação dos valores de REM está condicionada pela alteração de determinados parâmetros de projeto da cava – dentre eles o ângulo

de talude global, que pode liberar ou bloquear o minério adicionado à cava final, bem como incrementar ou reduzir a quantidade de estéril. É intuitivo que quanto menor o ângulo de talude global, maior a quantidade de estéril a ser removida para acessar o minério.

Durante a fase de projeto ou mesmo de produção, pode haver necessidade de mudanças na geometria dos acessos para adequações operacionais. Dentre os diversos parâmetros geométricos que podem ser afetados por essas alterações estão a largura da pista, a inclinação longitudinal e a necessidade de incluir *switchbacks*. Segundo Hustrullid, Kuchta e Martin (2013), é indispensável que essas alterações sejam planejadas e analisadas com especial atenção para avaliar os impactos que decisões dessa natureza tenham no ângulo de talude global.

Dessa forma, mensurar a REM de acordo com as características geométricas do depósito, o projeto de cava e a incorporação de estradas é algo necessário para entender as consequências de decisões tomadas em fase de projeto que irão se perpetuar por toda a vida útil da operação, como um aumento da movimentação de estéril e eventual elevação do custo de lavra (FRITH; COLWELL, 2011).

No que diz respeito ao projeto funcional, uma das variáveis que podem afetar significativamente o desempenho dos caminhões é a resistência ao rolamento (KAUFMAN; AULT, 1977). Esse parâmetro é a combinação de forças que um veículo deve superar para se mover em uma superfície especificada, indicando a qualidade das estradas não pavimentadas na mineração. Já a resistência total é a soma de resistência ao rolamento e da inclinação da estrada, ambas expressas em porcentagem (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

A velocidade máxima dos caminhões em uma mina é função da resistência total, sendo comumente estimada por curvas de Rimpull fornecidas pelas fabricantes de caminhões fora de estrada. De acordo com Thompson (2011), o desempenho do caminhão está fortemente relacionado à resistência ao rolamento, mostrando que

cada 1% de aumento nesse valor, a velocidade do caminhão pode ser reduzida em aproximadamente 10% em uma descida e até 26% em subida.

Do ponto de vista econômico, Thompson (2011) também afirma que cerca de 50% dos custos de operação da mina estão associados ao transporte, que é afetado pela qualidade da estrada e, conseqüentemente, pela resistência ao rolamento. Outros indicadores de desempenho também são afetados pela resistência ao rolamento: produtividade, consumo de combustível, substituição de pneus, emissões de gases, manutenção e segurança das operações de caminhão de transporte em minas de superfície (SOOFASTAEI, 2017; THOMPSON; PERONI; VISSER, 2019).

Em relação à manutenção das estradas, Thompson e Visser (2003) propuseram uma abordagem sistemática, denominada *Maintenance Management System* (MMS). O conceito principal é identificar e selecionar uma frequência ideal de manutenção de estradas considerando os custos totais - uma que combinação dos custos de manutenção de estradas e da operação de veículos (*Vehicle Operating Costs* - VOC). Como pode ser visto na Figura 1, essa abordagem também é dependente da resistência ao rolamento, se mostrando ser um fator chave para a aplicabilidade do MMS.

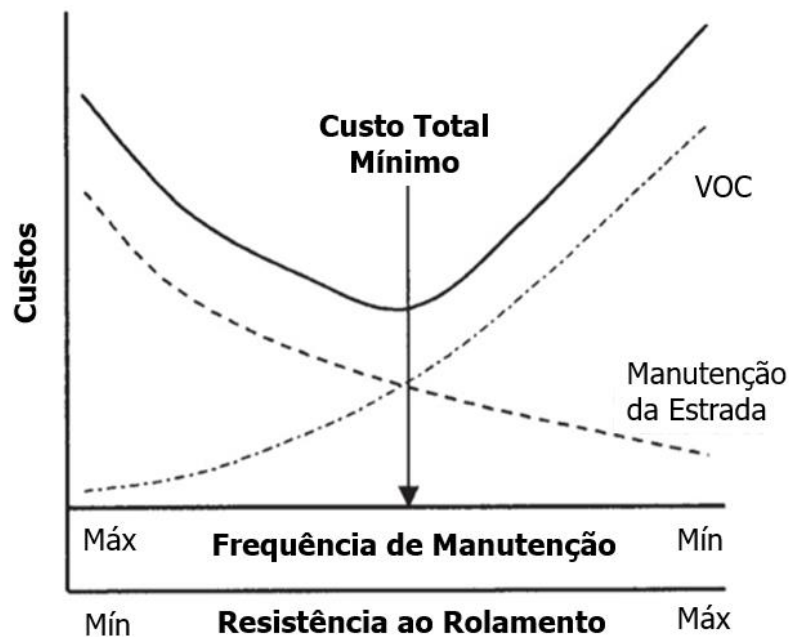


Figura 1 - Resistência ao rolamento ótima associada ao custo mínimo total.

Fonte: adaptado de Thompson e Visser (2003)

Embora a determinação da resistência ao rolamento seja possível com as avaliações quantitativas e qualitativas propostas por Thompson e Visser (2000) usando o *Roughness Defect Score* (RDS), tais procedimentos podem ser demorados e limitados à capacidade da equipe para classificar os defeitos das estradas. Assim, abordagens alternativas foram sugeridas por outros estudos para avaliar as condições das estradas de transporte usando dados de caminhões e sistemas de despacho (HUGO; THOMPSON; VISSER, 2008; JOSEPH; CURLEY; ANAND, 2017; PROOF ENGINEERS, 2021; THOMPSON, 2017; VAN STADEN; THOMPSON; VISSER, 2006). Os sistemas de despacho já são uma característica comum de muitas minas de alto desempenho em todo o mundo e estão se tornando uma alternativa para avaliar a resistência ao rolamento e auxiliar os sistemas de gerenciamento de manutenção em tempo real (*Real Time Maintenance Management Systems - RT-MMS*), permitindo que as empresas melhorem a eficiência e a produtividade e reduzam o transporte geral custos.



Tendo em vista a grande importância que as estradas possuem nos empreendimentos de mineração, o projeto geométrico e a resistência ao rolamento - componentes fundamentais das estradas, serão tema dessa dissertação através do modelo escandinavo. Nesse formato, será apresentado dois artigos publicados em periódicos internacionais e a integração deles, tendo como principal objetivo apresentar os pontos convergentes que fazem com que ambos sejam complementares.

### **1.1 Justificativa**

Em minas a céu aberto, o projeto de estradas influencia diretamente na eficiência do transporte da operação. A má gestão das vias da mina acarreta o aumento dos custos operacionais e prejudica diretamente a eficiência operacional dos equipamentos de carga, diminuindo a produção e criando um ambiente de tráfego não seguro (SOKOLIC; RAWLINS; DUFFY, 2010).

Como explicitado anteriormente, é evidente a relação de dependência entre o projeto geométrico, REM e implicações econômicas ao empreendimento. Esta temática é apresentada no artigo 1 da dissertação, com uma avaliação dos impactos na REM, no bloqueio ou liberação de minério, na massa de estéril incrementada ou reduzida e no ângulo de talude global da cava final de dois diferentes tipos de depósitos – um verticalizado e outro horizontalizado, variando parâmetros geométricos dos acessos.

Também fica clara não só a importância da resistência ao rolamento na eficiência operacional dos caminhões, mas a necessidade de desenvolver ferramentas para sua estimativa com dados que já estão em mãos das empresas (como os dados fornecidos pelos sistemas de despacho). O artigo 2 sugere uma metodologia para essa estimativa, calculado a resistência ao rolamento indiretamente por meio de um processo semiautomático que utiliza dados de despacho de mina e que produz informações úteis para a tomada de decisões referentes à rotina de manutenção das estradas em tempo real.

Desta forma, a integração dos artigos justifica-se na medida em que há a necessidade de estabelecimento de avaliações, técnicas e metodologias que garantam melhores estradas. Benefícios significativos podem ser alcançados com a integração dos artigos, como melhorar o desempenho da frota, diminuir o tempo de ciclo, aumentar velocidades, aprimorar a segurança do tráfego de veículo, reduzir os custos operacionais e aumentar a produção.

## **1.2 Meta**

Desenvolver metodologias de análise do impacto de variações em geometria e estimativa de resistência ao rolamento para estradas de mina não pavimentadas, tanto em fase de projeto como em fase de operação, com foco no monitoramento e manutenção das vias.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Para atingir a meta, os seguintes objetivos específicos foram propostos em cada um dos artigos:

### **1.3.1 Artigo 1**

- i. Variar parâmetros geométricos dos acessos (inclinação, largura e adição de *switchbacks*) e comparar os impactos na REM e ângulo global de talude em dois tipos de depósitos: um verticalizado e outro mais horizontalizado;
- ii. Identificar melhores cenários geométricos para incremento de minério e redução de estéril de cavas verticalizadas e horizontalizadas;
- iii. Criar gráficos de regressão que possibilitem ampliar a análise para outros depósitos que possuam geometrias equivalentes para uma primeira aproximação do impacto na REM para diferentes alternativas de projeto de estradas em cavas finais.

### 1.3.2 Artigo 2

- iv. Estimar indiretamente a resistência ao rolamento utilizando a informação de inclinação longitudinal da via e dados de velocidade do sistema de despacho por retro análise das curvas de Rimpull dos caminhões.
- v. Analisar se os valores estimados por retro análise permitem ajustar os coeficientes das equações de Cooper (Cooper 2008) para estimativa da resistência ao rolamento.
- vi. Aplicar as equações de Cooper nos pontos válidos coletados pelo sistema de despacho, produzindo várias estimativas da resistência ao rolamento para os trechos analisados;
- vii. Interpoliar os valores dos dados estimados para criação de mapas de resistência ao rolamento, qualidade das estradas e prioridade de manutenção.

## 1.4 Metodologia

As metodologias dos trabalhos são detalhadas em cada um dos artigos, que estão apresentados em sua forma original no item 3. A seguir, será apresentado um breve resumo de cada uma das metodologias apresentadas nos artigos.

### 1.4.1 Artigo 1

Para avaliar as consequências das variações dos parâmetros geométricos, foram selecionados dois tipos de depósitos com diferentes geometrias, sendo um corpo mais verticalizado e um segundo mais horizontalizado. As cavas matemáticas desses depósitos foram geradas utilizando o *software* NPV Scheduler, resultantes da maximização do valor presente líquido (VPL) através do algoritmo de otimização de Lerchs-Grossmann (LERCHS; GROSSMANN, 1965; TOLWINSKI; UNDERWOOD, 1996). As cavas operacionais foram geradas utilizando o *software* Datamine Studio

OP, a etapa de projeto das cavas envolve a inclusão das estradas para acessar cada uma das bancadas de cada um dos depósitos.

Para cada tipo de depósito, foram gerados diferentes cenários variando os parâmetros geométricos dos acessos da cava – largura e inclinação longitudinal, além da inclusão de *switchbacks* com diferentes raios de curvatura. Os ângulos de talude globais de todos os cenários foram medidos pela média dos valores de 6 seções transversais distintas da cava. Por fim, a análise comparativa foi realizada avaliando as diferenças percentuais na REM, nas massas de minério e estéril (incrementada ou reduzida) e no ângulo de talude global dos cenários das duas cavas em relação com a suas cavas operacionais de referência.

#### **1.4.2 Artigo 2**

A metodologia usada no segundo artigo foi realizada com dados de uma mina de minério de ferro localizada no sudeste do Brasil. A empresa forneceu um conjunto inicial de 2 segmentos de estrada com trechos de diferentes geometrias e inclinações. Além disso, foram fornecidos dados do sistema de despacho com aproximadamente 665.000 registros coletados a cada 30 segundos de uma frota de caminhões elétricos Komatsu 830E-AC, contendo a localização e velocidade instantânea dos caminhões, além de outras informações.

A primeira etapa foi selecionar segmentos homogêneos da estrada através da análise da geometria de todos os trechos do acesso buscando por setores onde os perfis longitudinais fossem aproximadamente constantes e velocidades com baixa variabilidade. Para essa seleção, foram utilizadas estimativas e análise visual da inclinação das topografias e dos registros de velocidade nas duas estradas inicialmente fornecidas. O resultado gerou três trechos para serem utilizados na retro análise para estimativa de resistência ao rolamento.

A segunda etapa consistiu em um pré-tratamento dos registros do despacho dentro dos trechos, já que alguns valores inconsistentes de velocidades foram encontrados

no conjunto inicial, como velocidades nulas e/ou valores extremamente altos, incompatíveis com o equipamento ou o trecho analisado. Foi aplicado um limite superior nos dados e a remoção de *outliers* pelo método de Tukey para a seleção de amostras representativas dentro dos segmentos.

Na terceira etapa, foram realizadas as retro análises da resistência ao rolamento *in situ* utilizando as curvas de Rimpull para cada trecho e condição de operação dos caminhões (cheio ou vazio). Esses valores foram utilizados para ajustar os coeficientes das equações de Cooper (2008) a fim de utilizá-las em todos os registros de velocidade provenientes do sistema de despacho, resultando em diversos valores de resistência ao rolamento locais. A interpolação desses valores possibilitou a geração de mapas de isovalores da variável “resistência ao rolamento – RR” das estradas, permitindo avaliar de forma visual a condição local e global dos acessos e auxiliando na definição de priorização das atividades de manutenção.

### **1.5 Contribuição da Dissertação**

A importância científica da integração dos artigos está nas avaliações e metodologias criadas por eles com foco no aprimoramento do projeto de estradas, diminuição dos custos de lavra associados ao carregamento e transporte e maximização do valor dos projetos de mineração. Além disso, a contribuição dos estudos também está presente na utilização de dados que normalmente são coletados pelas minas, mas que muitas vezes não são usados adequadamente para produzir informações úteis para a tomada de decisão. Além disso, as avaliações e metodologias desenvolvidas por ambos os artigos para melhor seleção dos parâmetros geométricos, monitoramento e manutenção de estradas é fundamental para melhorar o desempenho da frota de caminhões e, principalmente, reduzir os custos operacionais.

### **1.6 Organização da Dissertação**

O formato de dissertação em modelo escandinavo é regulamentado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica da Universidade

Federal do Rio Grande do Sul (PPGE3M - UFRGS), o qual exige que para a apresentação da dissertação em tal formato, a mesma deve ser composta por 2 (dois) artigos científicos publicados, ou formalmente aceitos na sua forma final para publicação, em periódico internacional e classificado como tal pela CAPES e apresentada em documento formal.

Seguindo a regulamentação do PPGE3M, esta dissertação é composta por dois artigos. Ambos foram publicados em periódicos internacionais classificados na Plataforma Sucupira da Qualis - Sistema brasileiro de avaliação de periódicos, mantido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Além dos dois artigos, este documento é composto pelo Resumo, Abstract, e seções de Introdução, Revisão Bibliográfica, Integração de Artigos, Conclusões e Recomendações e Referências. Os dois artigos científicos serão incluídos conforme as suas versões finais de publicação, de acordo com as normas das respectivas revistas. As referências também já serão apresentadas no corpo dos artigos científicos conforme publicados, salvo as referências presentes no restante da dissertação.

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão bibliográfica que sirva de base para a integração dos artigos apresentados nesta dissertação. Primeiramente será introduzido o tema das estradas de mineração e sua importância. Após, os projetos geométrico, estrutural e funcional serão detalhados. Por fim, aspectos referentes ao monitoramento e manutenção de estradas serão apresentados.

### **2.1 Estradas de Mineração**

O projeto de construção e manutenção de estradas de mineração é de extrema importância para um empreendimento mineiro. Uma estrada em boas condições e bem dimensionada impacta diretamente na produtividade dos equipamentos de carga e transporte, na manutenção e na segurança das operações mineiras e nos custos associados, chegando a até 50% dos custos operacionais totais de lavra (THOMPSON, 2010). No que tange à impacto nas escavações a céu aberto, o projeto de estradas possui reflexo direto nos resultados de massas de estéril e minério movimentados, interferindo na relação estéril-minério (REM) e na eficiência geométrica da cava.

Segundo Thompson e Visser (1997), as estradas e acessos de mina devem ser construídos levando em conta as características particulares da região, além de fatores operacionais, como por exemplo, o tamanho e especificações da frota de caminhões, o material disponível para sua construção e manutenção, intensidade de tráfego da frota e legislação/normas em vigor. Durante anos utilizou-se uma metodologia empírica no dimensionamento de estradas, pautada principalmente em observações locais que nem sempre permitem uma avaliação de custo-benefício apropriada. Porém, com o aumento recente do número de caminhões ultra pesados, Thompson 2011 sugere que este método se mostrou ineficaz, aumentando custos operacionais e com manutenção das estradas e equipamentos.

Desta forma, uma abordagem integrada que considerasse todas as relações entre os elementos das estradas foi necessária, atendendo os seguintes objetivos:

- Garantir a segurança ocupacional de todos os usuários da estrada;
- Reduzir os custos operacionais através do aumento da vida útil dos equipamentos, resultados da redução das tensões nos eixos dos caminhões, pneus e suspensão;
- Aumentar a produção através da diminuição do tempo de ciclo dos caminhões;
- Diminuir o custo por quantidade de material transportado pela maior utilização dos caminhões;
- Diminuir a periodicidade de manutenção das estradas através de uma rotina mais eficiente.

Assim, para se alcançar esses objetivos e estradas de mineração de alta eficiência econômica, Thompson, Peroni e Visser (2019) sugerem que o projeto de construção e manutenção das estradas deveria englobar diferentes etapas, dentre as quais estão os projetos geométrico, estrutural e funcional, resumidos a seguir:

- a) Projeto geométrico: são definidos o dimensionamento de largura da via, altura de berma, raio de curvatura, inclinação longitudinal e transversal da via, que são projetados e calculados a partir de informações das características dos equipamentos em circulação na mina, drenagem de água, normas e elementos de segurança;
- b) Projeto estrutural: é definida a espessura e selecionado o material utilizado para compor a camada de base conforme a necessidade de atenuação da carga que é imposta pelos veículos que ali transitam durante a vida útil da via;
- c) Projeto funcional: é definida a camada superficial para isolar o pneu dos veículos que transitam na via do contato com a camada estrutural de base. É



avaliada a resistência ao rolamento, escoamento de água, tamanho de partículas entre outras características necessárias para o correto dimensionamento e seleção do material de revestimento.

Os detalhes referentes a cada projetos serão apresentados nos próximos tópicos, seguido de uma seção sobre monitoramento e manutenção das estradas e desses elementos.

## **2.2 Projeto Geométrico de Estradas**

Tipicamente, em lavra a céu aberto, a produção é movimentada com caminhões e para que esses possam alcançar as frentes de lavra é necessária a utilização de rampas de acesso. Nesse contexto, o projeto geométrico tem como objetivo dimensionar as estradas levando em consideração as condições operacionais e os equipamentos trafegando por ela (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

Além disso, Sousa (2011) também sugere que um projeto geométrico deve correlacionar os seus elementos físicos com as características de operação, frenagem, aceleração, condições de segurança, levando em conta também as condições que levem ao maior rendimento dos equipamentos de transporte. Outro ponto interessante é levantado por Thompson (2011), que diz que o objetivo principal do projeto geométrico dos acessos é garantir que os caminhões percorram o trajeto mais curto possível, com a velocidade máxima e garantia de segurança dos trabalhos.

Os principais elementos da geometria das estradas em cavas a céu aberto podem ser vistos na Figura 2.

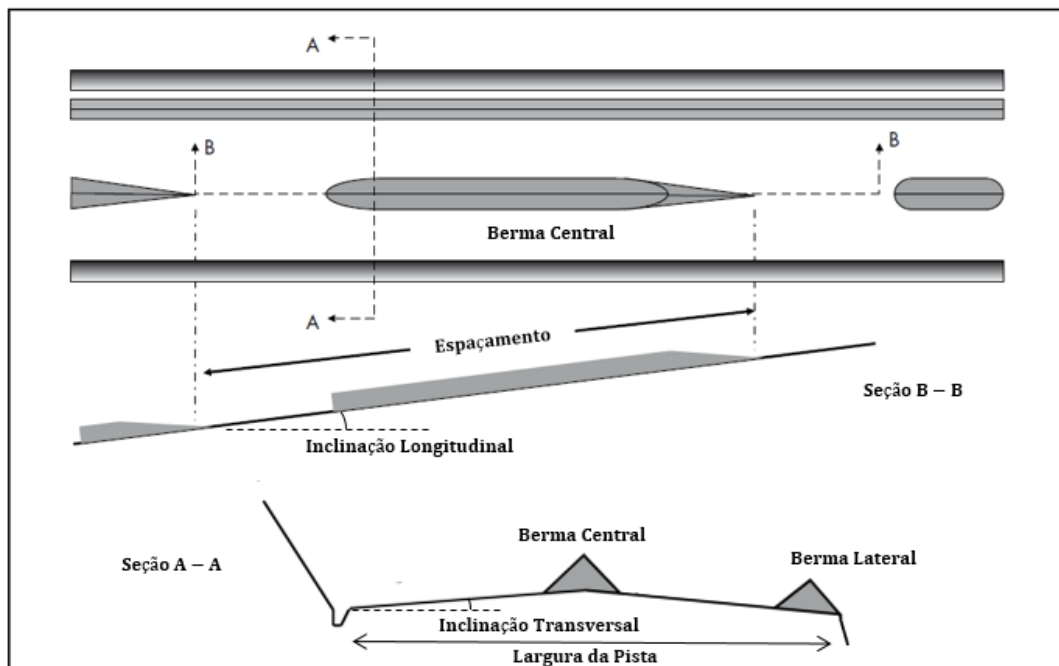


Figura 2 - Elementos geométricos de estradas em mineração.

Fonte: Adaptado de Thompson (2011)

Esses elementos serão detalhados a seguir de acordo com manuais, livros e normas que abordam o projeto geométrico de estradas de mineração (BRASIL, 1978; KAUFMAN; AULT, 1977; TANNANT; REGENSBURG, 2001, THOMPSON; PERONI; VISSER, 2019).

### 2.2.1 Largura da Estrada

Um projeto típico de estradas engloba bermas laterais ou centrais, duas vias de tráfego e um dreno. A Figura 3 exemplifica o design de uma seção transversal de estrada.

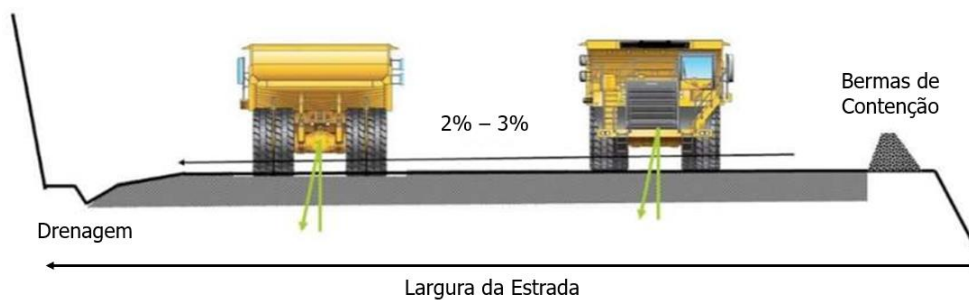


Figura 3 - Design típico de uma estrada em mineração.

Fonte: Adaptado de Peroni (2018)

A Equação 1 é utilizada para calcular a largura da estrada, de acordo com Norma Reguladora NR 22 (BRASIL, 1978), que trata dos requisitos de saúde e segurança na mineração.

$$L = (1.5 N + 0.5) \times LC \quad (1)$$

Onde  $L$  é a largura da estrada (m),  $N$  é o número de vias e  $LC$  é a largura do caminhão (m) fornecida pelo fabricante.

### 2.2.2 Bermas de Contenção

As bermas de contenção são elementos geométricos essenciais para a garantia de maior segurança para os equipamentos de tráfego e operação da mina. Segundo Thompson e Visser (1997), as bermas devem ter no mínimo  $2/3$  da altura do pneu do maior equipamento, diminuindo o risco de queda dos equipamentos, sendo calculadas pela Equação 2.

$$H = \frac{2}{3} HP \quad (2)$$

Onde  $H$  é a altura das bermas de contenção (m) e  $HP$  o diâmetro do pneu (m).

A largura da base da berma de contenção é calculada através do ângulo de repouso do material a ser utilizado e a altura.

### 2.2.3 Raio de Curvatura e Superelevação

As curvas de uma estrada devem ser projetadas com o maior raio possível, para que os equipamentos possam trafegar em velocidade constante e sem a troca de marchas, otimizando a performance dos equipamentos e aumentando a segurança.

O raio de curvatura mínimo pode ser calculado pela Equação 3.

$$R = \frac{v_0^2}{127(e+f)} \quad (3)$$

Onde  $v_0$  é a velocidade do veículo (km/h),  $f$  é o coeficiente de atrito e  $e$  é a superelevação (m/m).

O coeficiente de atrito  $f$  é especificado de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de atrito tipicamente utilizados conforme natureza do pavimento.

Natureza do Pavimento	Coeficiente 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: Adaptado de Peroni (2018)

A superelevação  $e$  é aplicada para compensar o efeito da força centrífuga sobre os veículos durante a curva, ela é selecionada através da Tabela 2.

Tabela 2 - Superelevação recomendada para curvas horizontais.

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

Fonte: Adaptado de Kaufman e Ault (1977)

Ao se aproximar da curva da pista, a inclinação vai subindo gradativamente até atingir seu valor máximo no centro da curvatura, que é representado pelos valores da Tabela 2. Após atingir este valor, ela começa novamente a reduzir gradativamente a

inclinação até atingir as condições normais. É preferível manter uma inclinação máxima de 5% para evitar erosão.

#### **2.2.4 Superlargura**

A superlargura representa o incremento na largura da pista considerando o cruzamento de dois veículos em uma curva. A superlargura é calculada através da Equação 4.

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

Onde  $S$  é a superlargura,  $N$  é o número de vias,  $R$  é o raio de curvatura (m),  $E$  é a distância entre os eixos do veículo (m) e  $v$  é a velocidade dos veículos (km/h).

#### **2.2.5 Distância de Parada**

A distância de parada, ou de frenagem, é a distância percorrida por um equipamento na velocidade de projeto desde o momento em que se nota um obstáculo na pista até a sua parada completa. Ela está diretamente ligada à distância de visibilidade. Se a distância de parada for menor do que a de visibilidade, teremos uma situação insegura, como a apresentada na Figura 4.

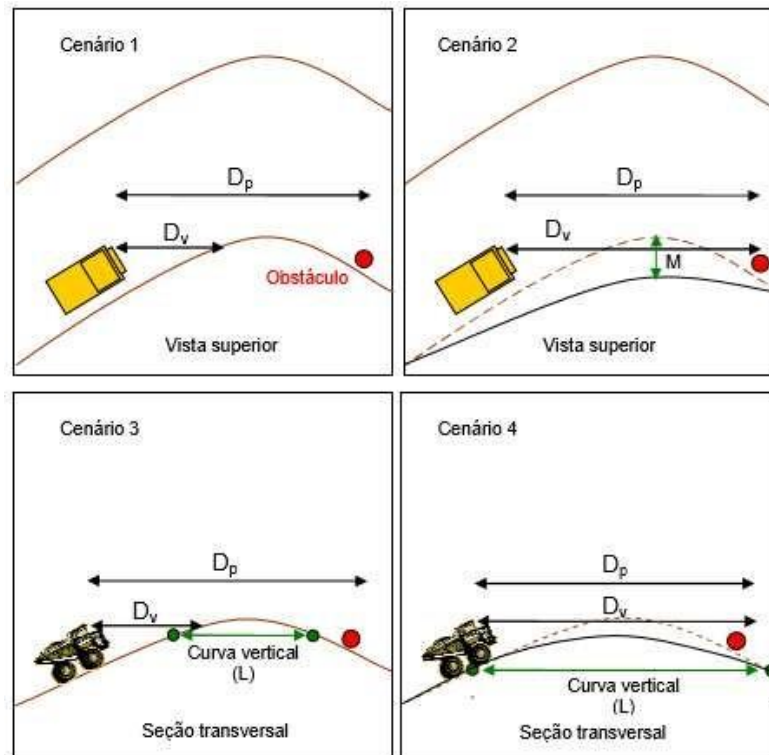


Figura 4 - Situações geométricas com diferentes cenários de segurança.

Fonte: Vale (2011)

A distância de frenagem pode ser calculada pela Equação 5.

$$SD = \frac{1}{2} g t \operatorname{sen} \theta + v_0 t + \frac{(g t \operatorname{sen} \theta + v_0)^2}{2 g (U_{\min} - \operatorname{sen} \theta)} \quad (5)$$

Onde  $SD$  é a distância de parada (m),  $g$  é a aceleração gravitacional ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $t$  é o tempo de reação (s),  $\theta$  é a inclinação da estrada (graus),  $U_{\min}$  é o coeficiente de atrito do pneu com a estrada e  $v_0$  é a velocidade do veículo (m/s).

Segundo Kaufman e Ault (1977), é usualmente adotado um tempo de reação de 1.5 s e coeficiente de atrito dos pneus com a estrada de 0.35.

### 2.2.6 Inclinação Longitudinal

A inclinação longitudinal de um determinado trecho da via pode ser obtida a partir da razão da distância vertical que o trecho alcança pela distância horizontal deslocada. Pode ser expressa em graus, mas é mais usualmente apresentada como relação percentual entre o desnível e o comprimento horizontal. Logo, a inclinação longitudinal da via pode ser calculada pela Equação 6.

$$G = \left(\frac{H}{C}\right) \times 100 \quad (6)$$

Onde  $G$  é a inclinação longitudinal (%),  $H$  é o desnível vertical (m) e  $C$  é a distância horizontal (m).

Nas inclinações longitudinais ascendentes, os valores das rampas são considerados valores positivos e, nas inclinações longitudinais descendentes, os valores são considerados negativos. Segundo Visser (2015), alterações abruptas na inclinação das vias prejudicam o desempenho de aceleração e retardo dos caminhões, além de demandar uma mudança constante de marcha. Isso pode levar a uma substituição frequente de componentes mecânicos, ocasionando maiores custos de manutenção.

Caminhões de grande porte (típicos da mineração) possuem melhor desempenho em declividades de 9% a 12%. Para menores inclinações, maiores distâncias de transporte seriam necessárias para uma mesma rampa, e conseqüente maior tempo de ciclo. Já para maiores inclinações, maiores custos operacionais seriam exigidos em decorrência de uma maior potência realizada pelos caminhões (THOMPSON; PERONI; VISSER, 2019).

### 2.3 Projeto Estrutural de Estradas

O projeto estrutural engloba o estudo do subleito que irá receber a pavimentação, para que sejam aplicadas camadas de base e revestimento de espessura e resistência adequadas. O projeto estrutural é necessário para que as estradas possam suportar o fluxo de equipamentos sem grandes deformações permanentes, para que não

necessite de manutenções excessivas, permitindo que os caminhões e equipamentos possam trafegar em velocidade compatível com o trecho, com segurança e sem paradas não programadas.

O projeto estrutural visa o dimensionamento das camadas que compõem o pavimento, que devem possuir capacidade de suporte suficiente para resistir aos carregamentos impostos à estrada durante a sua vida útil, sem deformações e manutenções excessivas. Thompson (2011) enfatiza que no projeto estrutural, as camadas do pavimento devem ser compatíveis com o material *in situ* e o volume de tráfego previsto para a rede de estradas da mina.

A Figura 5 apresenta a seção típica de um pavimento flexível com seus principais elementos. Os principais a serem discutidos nesta seção são o subleito, a sub-base, a base e o revestimento, sendo o revestimento apenas dimensionado no projeto estrutural, pois possui maior caráter funcional - será discutido na próxima seção.

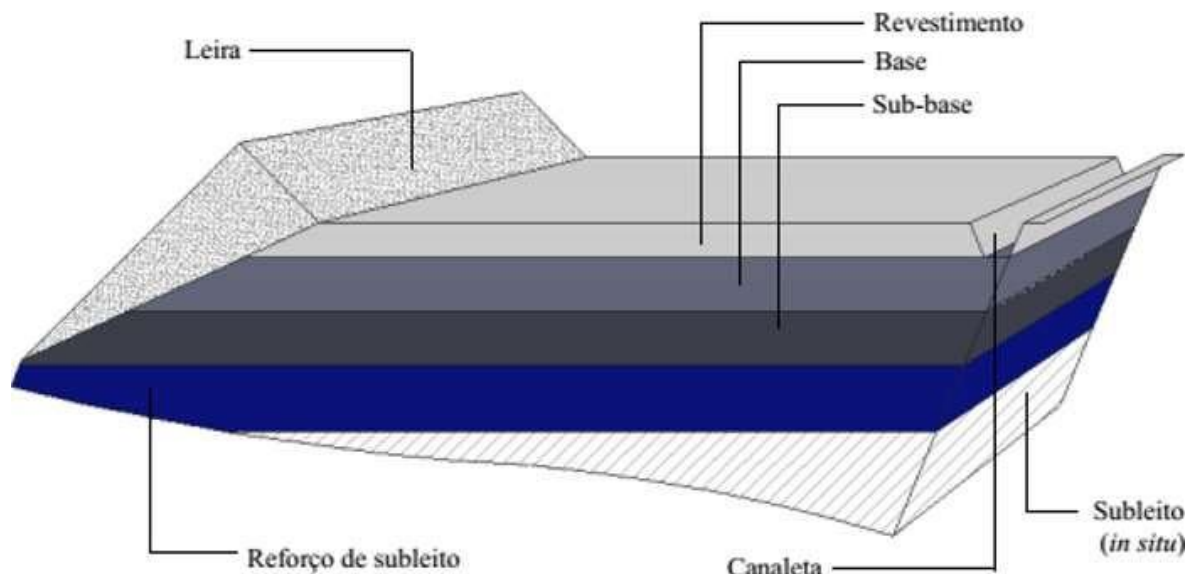


Figura 5 - Seção típica de um pavimento flexível de estradas.

Fonte: Sousa (2011)

Tendo em vista que esta dissertação não foca no projeto estrutural, a seguir será apresentado um breve resumo sobre a formação e objetivo de cada camada e os



métodos para dimensionamento das mesmas (THOMPSON; PERONI; VISSER, 2019).

O subleito é corresponde a camada de material *in situ*. É a camada de fundação e deve estar protegida de todos os carregamentos aplicados nas camadas superiores. Essa camada pode sofrer deformações dentro da faixa recomendada para a sua classificação.

A sub-base é geralmente constituída de material granular, funcionando como uma camada de drenagem e distribuindo os carregamentos, é uma camada opcional e utilizada geralmente quando o subleito é incompetente ou para aterros.

A base é uma camada compacta, de alta resistência e estabilidade. Ela protege a sub-base de mudanças de volume, expansão ou desagregação, esta camada distribui as tensões atuantes no revestimento para que não resultem em deformações excessivas na camada abaixo (subleito). O dimensionamento adequado da base é fator fundamental para uma pavimentação competente e duradoura, que atende as especificações de projeto.

Revestimento é a camada superficial do pavimento, possui a função de selar as camadas inferiores da entrada de água. Além de transmitir a carga aplicada para a base, ela possui ação protetora contra o contato entre pneus e a base e o cisalhamento.

Segundo Thompson e Visser (1997), o dimensionamento das camadas que compõem a via pode ser realizado através da utilização de três métodos, sendo eles: metodologia CBR feita em laboratório, CBR de campo, e CBR obtido através do método mecanístico.

### 2.3.1 Método CBR de laboratório

O método CBR, conhecido também como Índice de Suporte Califórnia, é um dos métodos empíricos mais utilizados para o dimensionamento das camadas de um pavimento.

O CBR é dado pela razão percentual entre a pressão exercida por um pistão que compacta uma amostra de solo escolhida e a pressão exercida pelo pistão nas mesmas condições em uma amostra padrão, de brita graduada com CBR igual a 100% (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013). A Figura 6 apresenta o gráfico com as curvas de CBR, que relacionadas com a máxima carga por roda aplicada ao pavimento geram as espessuras indicadas de cada camada de pavimento.

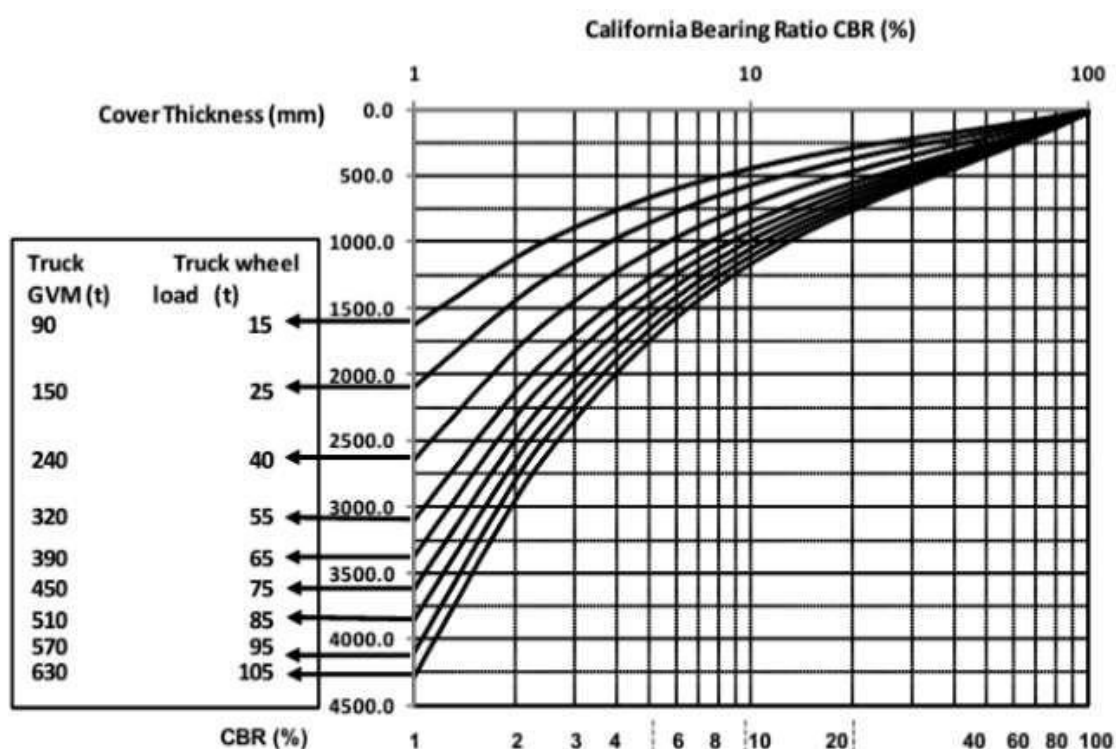


Figura 6 - Gráfico de curvas de CBR.

Fonte: Thompson, Peroni e Visser (2019)

Para o cálculo das camadas de pavimento, encontra-se primeiramente a carga por roda do maior equipamento que utiliza a via, de acordo com o peso bruto de operação

e a sua distribuição entre os eixos encontrado no manual do fabricante. Ao peso bruto por roda, é adicionado 20% deste valor, levando em consideração a sobreposição das cargas sobre roda em um mesmo lado do eixo, de acordo com a sugestão de Kaufman e Ault (1977).

Após o cálculo do valor de carga, utilizam-se os valores de CBR do subleito e dos materiais que serão utilizados nas demais camadas e através do gráfico, são determinadas as espessuras das camadas superiores a cada CBR.

Thompson (2009) lista algumas restrições ao uso desse método na construção de estradas de mina. Isso se deve por este método ter sido desenvolvido para estradas pavimentadas e a grande diferença, principalmente de materiais de construção e dos equipamentos que trafegam nessas estradas. Nesse método não são consideradas as propriedades do revestimento, e o módulo de elasticidade dos materiais é considerado constante, mesmo havendo uma grande diversidade de materiais com propriedades distintas para a construção do pavimento das estradas de mina. Porém, este método é simples, de resultados rápidos e de fácil utilização. Ele não gera muitos problemas para cargas leves e para estradas temporárias.

### **2.3.2 Método CBR de campo**

Nesta variação do CBR, utiliza-se o DCP – *Dynamic Cone Penetrometer*, que é um equipamento que fornece o CBR de forma estimada, medindo a taxa de penetração do equipamento no material *in situ* a partir de um número fixo de golpes aplicados por um martelo de queda à uma altura constante. Esta metodologia possui custos reduzidos, já que não necessita que sejam feitas análises em laboratório. Além disso, este método obtém a informação diretamente em campo, sendo uma ótima alternativa para o dimensionamento das camadas em estradas de mineração (PERONI, 2018).

O equipamento utilizado possui uma parte superior composto por uma empunhadura. Logo abaixo, há um peso cilíndrico de 8 kg que se desloca livremente na vertical pela haste. O peso é solto da altura fixa de 575 mm sobre um disco que transfere a energia

da queda para a haste. Na lateral do equipamento há uma régua que permite fazer a leitura a taxa de penetração.

O DCP e seus componentes descritos anteriormente podem ser vistos na Figura 7.

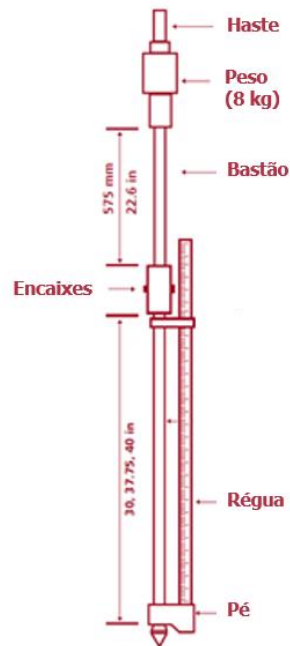


Figura 7 - DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*).

Fonte: Adaptado de Peroni (2018)

Os valores médios de penetração obtidos pelo ensaio são então levados para o ábaco padrão para obtenção do CBR do material (Figura 8) e posterior definição das profundidades de cada uma das camadas (Figura 9) e com as recomendações de espessura de camada segundo o método do CBR.

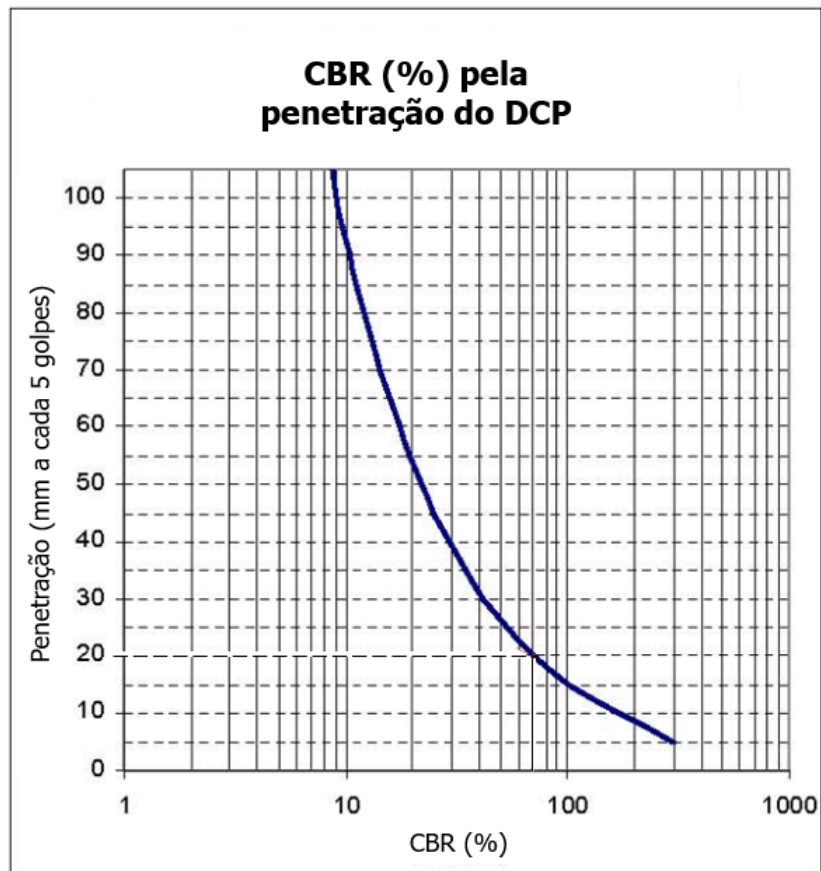


Figura 8 – Valores de CBR pela penetração do DCP.  
 Fonte: Adaptado de Peroni (2018)

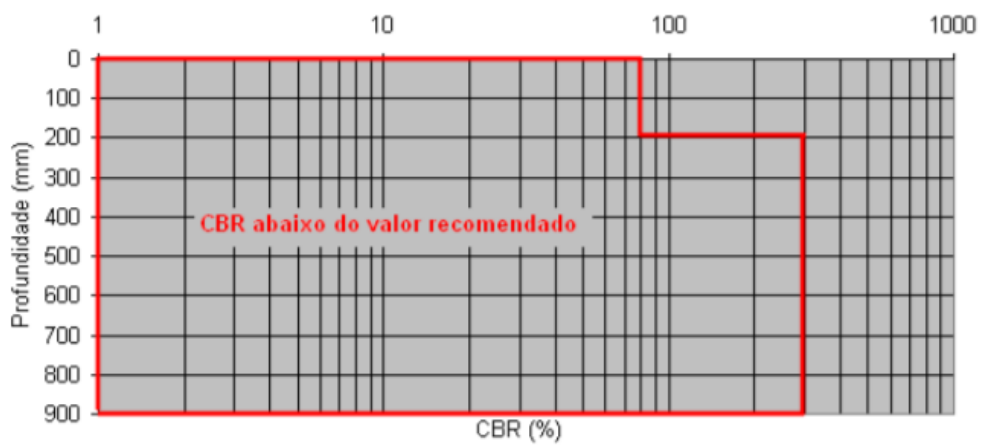


Figura 9 – Profundidade pelo CBR.  
 Fonte: Adaptado de Peroni (2018)

### 2.3.3 Método Mecanístico

Os métodos mecanísticos - empíricos de dimensionamento de pavimentos, são métodos baseados em modelos matemáticos de análise estrutural. A sua utilização vem crescendo com o desenvolvimento de novos *softwares*, como o *KenPave*.

Thompson e Visser (2002) sugere um sistema de classificação de vias que leva em conta o volume de tráfego e os níveis de desempenho da estrada. A Tabela 3 apresenta o quadro resumo destas especificações, onde os valores do índice de performance são baseados na performance estrutural da estrada, onde 10 é considerado com performance excelente e 1 com performance extremamente baixa.

Tabela 3 - Categorias de estradas de mina.

<b>Categoria</b>	<b>Tráfego Diário (kt)</b>	<b>Índice de Performance</b>	<b>Descrição</b>
Categoria I	> 25	7 – 9	Permanente e alto volume de tráfego nas principais estradas de transporte a partir de rampas até o beneficiamento de minério ou sistemas de disposição de estéril. Tempo de operação de pelo menos 20 anos.
Categoria II	8 – 24	5 - 6	Semi permanentes com médio volume de tráfego em cava e fora da cava. Tempo de operação até 10 anos.
Categoria III	< 7	>4	Provisórias em cava e fora da cava de baixo volume de tráfego. Tempo de operação até 3 anos.

Fonte: Adaptado de Thompson e Visser (2002)

A Tabela 4 apresenta os valores limites de deformação vertical admissíveis no subleito para cada categoria.

Tabela 4 - Valores limite de deformação vertical no pavimento em função da categoria da estrada.

Categoria	Faixa de valores limites de deformações verticais ( $\mu\epsilon$ )	
	Volume de tráfego > 100.000 t/dia	Volume de tráfego < 100.000 t/dia
Categoria I	900	1500
Categoria II	1500	2000
Categoria III	2000	2500

Fonte: Adaptado de Thompson e Visser (2002)

Após a entrada das coordenadas de cálculo, devem ser estruturadas as informações sobre o equipamento que aplicará as maiores tensões ao pavimento para dimensionamento das camadas. São elas o raio de contato da tensão ( $CR$ ), a pressão de inflação do pneu ( $CP$ ) e a distância entre os centros das duas rodas traseiras no eixo Y. Essas informações estão apresentadas no manual do fabricante dos pneus recomendados para o modelo de equipamento.

## 2.4 Projeto Funcional de Estradas

O projeto funcional engloba a adequação do material utilizado no revestimento da estrada. Além de garantir as características gerais de segurança, produção e custos, ele deve englobar o controle de poeira, tração e a resistência ao rolamento. Além disso, a qualidade do revestimento interfere diretamente na vida útil dos pneus, evita a percolação de água na base e na sub-base, reduz a taxa de deterioração das vias e de emissão de particulados (THOMPSON; VISSER, 2003).

Conforme Visser (2015), geralmente a camada de revestimento é feita com uma mistura de materiais. O intuito de misturar os materiais é o de conferir qualidades comuns aos produtos misturados, gerando uma sinergia das qualidades. O material indicado para o revestimento é aquele que possui as características de coeficiente de graduação e produto de contração dentro da faixa admissível apresentada na Figura 10. Porém, é preferível que a qualidade do material fique dentro do quadrado de cor azul, considerada ideal.

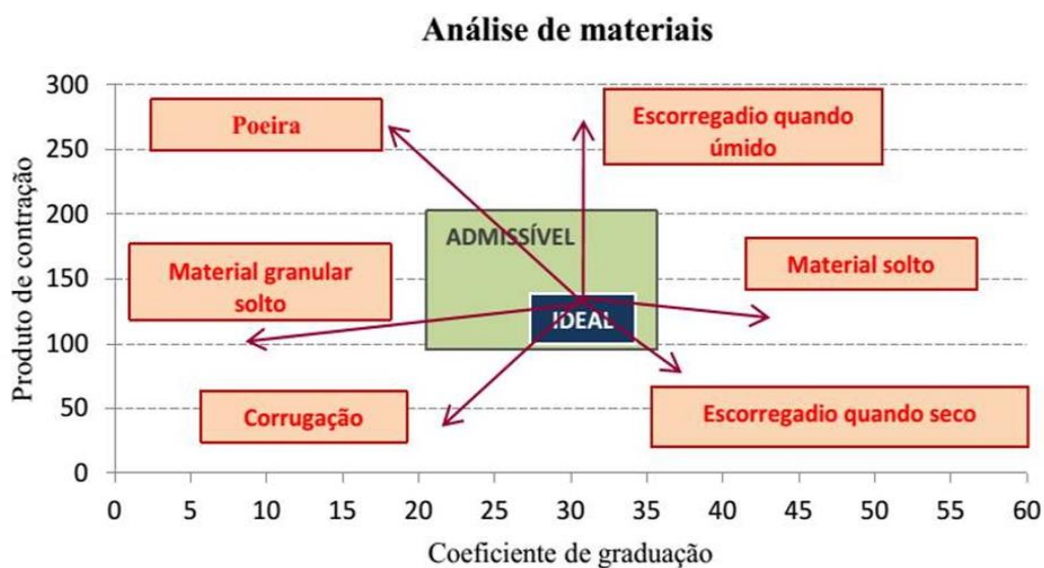


Figura 10 - Gráfico para seleção do material de revestimento

Fonte: Adaptado de Visser (2013)

O fraco desempenho funcional manifesta-se por piora na qualidade de condução dos caminhões, velocidades reduzidas, maiores tempos de ciclo, poeira excessiva, maior frequência de manutenção dos caminhões, aumento do desgaste de peças e pneus, perda de produtividade, entre outros. Esses efeitos resultam no aumento no custo geral de operação e manutenção dos equipamentos de carga e transporte.

Thompson e Visser (2000) listam quais seriam as propriedades sugeridas para os materiais para revestimento das estradas não pavimentadas. Essas características são descritas a seguir:

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



- Ausência de revestimento escorregadio excessivo em clima úmido;
- Baixo custo e facilidade de manutenção

### Resistência ao Rolamento

Thompson e Visser (2006) sugerem que um elemento fundamental na redução de custos relacionados ao transporte e projetos funcional é a resistência ao rolamento, que é uma energia de resistência que o solo faz contra o movimento do pneu, sendo considerada uma energia extra que o equipamento gasta para se movimentar. A resistência ao rolamento pode existir devido a deformações do pneu, deformações no revestimento da estrada, afundamento do pneu no revestimento e de deformações do pavimento abaixo do pneu, como defeitos nas estradas.

A Figura 11 apresenta um esquema com alguns fatores que influenciam na resistência ao rolamento.

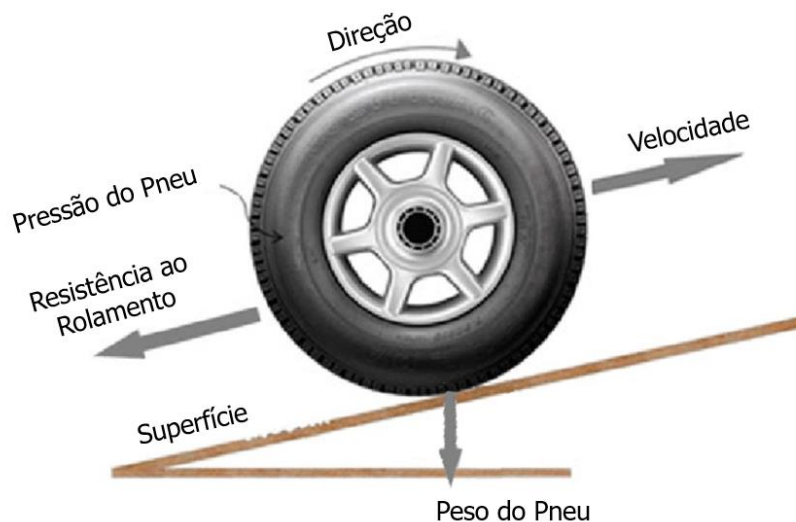


Figura 11 - Desenho esquemático de um pneu e parâmetros que afetam a resistência ao rolamento.

Fonte: Adaptado de SOOFASTAEI *et al.* (2016)

Essa energia extra gera maior desgaste de pneus e peças dos equipamentos, aumenta os gastos com manutenção e com combustível, diminui a eficiência dos equipamentos e pode levar a reinvestimentos prematuros na frota de caminhões, caso

esteja acima dos limites toleráveis. Por exemplo, para um empreendimento que movimentava 30 milhões de toneladas por ano e que utiliza uma frota de caminhões com capacidade de 290 t operando em uma pista de 4 km com 10% de inclinação, se a resistência ao rolamento for reduzida de 6% para 2%, o reinvestimento em equipamentos e os custos operacionais iriam reduzir entre 18% e 16% (THOMPSON; VISSER, 2006).

Segundo Caterpillar (2016), a resistência ao rolamento é afetada pelas condições do solo e pela carga - quanto mais a roda afunda no solo, maior a resistência ao rolamento. Através de observações, verificou-se que a resistência devido à penetração do pneu é de aproximadamente 1,5% do peso bruto da máquina para cada polegada de penetração do pneu (0,6% para cada cm de penetração do pneu). Assim, a resistência ao rolamento pode ser calculada pela Equação 7.

$$RR = [2\% + (0.6\% \times a)] \times GVM \quad (7)$$

Onde *RR* é a resistência ao rolamento, *a* é a penetração do pneu (cm) e *GVM* é a massa bruta do veículo.

Além de calculada, a resistência ao rolamento pode ser estimada. Na Tabela 5 é possível verificar a relação entre a condição das estradas e uma estimativa para a resistência ao rolamento.

Tabela 5 – Estimativa da resistência ao rolamento em função da condição da estrada.

<b>Condição da via</b>	<b>Resistência ao Rolamento (%)</b>
Camadas fortes e estradas bem construídas, compactadas (estabilizadas), com baixa penetração do pneu	2
Camadas de resistência intermediária, estradas compactadas (estabilizadas), bem construídas e frequentemente mantidas, com penetração mínima (<25 mm) do pneu	2 - 3
Camadas ou material de revestimento fracos, penetração do pneu de 25 - 50 mm, com sulcos e mal conservada	3 - 5

Fonte: Adaptado de Thompson, Peroni e Visser 2019

Modelos de custo operacional de caminhões para frequência ótima de manutenção de vias utilizam a resistência ao rolamento como principal parâmetro da avaliação. Dentre os diversos indicadores de performance operacional afetados pela resistência ao rolamento, Soofastaei (2017) lista: produtividade, consumo de combustível, emissão de gases, manutenção e segurança da operação.

A Figura 12 mostra como a resistência ao rolamento interfere nos custos relacionados com consumo de combustível e produtividade.

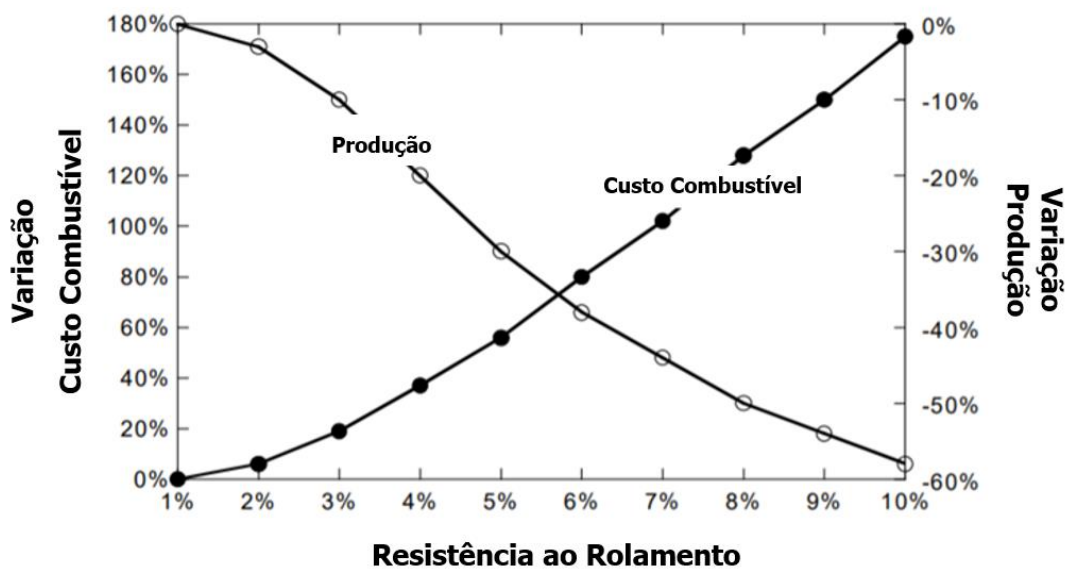


Figura 12 - Relação entre resistência ao rolamento, produção e consumo de combustível.

Fonte: Adaptado de Tannant e Regensburg (2001)

Apesar das implicações econômicas de baixos valores da resistência ao rolamento, é necessário que exista um equilíbrio com a rotina de manutenção das estradas. Toma-se como exemplo uma resistência ao rolamento muito baixa, com custo de transporte reduzidas, onde a frequência de manutenção e os custos associados são muito altos. Por outro lado, uma maior resistência ao rolamento gera maiores custos operacionais

relacionado à operação dos caminhões, mas com manutenção reduzida. Nesse sentido, a busca de um custo total mínimo se dá considerando os dois componentes – operação e manutenção, o qual também fornecerá a resistência ao rolamento e frequência de manutenção ótima (Figura 1).

Um sistema para identificar e quantificar a resistência ao rolamento através de inspeção visual foi desenvolvido por Thompson e Visser (2000). Nessa metodologia, classifica-se a gravidade e a extensão dos defeitos no revestimento da estrada em uma escala de 1 a 5, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Avaliações da resistência ao rolamento em revestimento.

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

Fonte: Adaptado de Thompson e Visser (2000)

As pontuações são inseridas em uma planilha desenvolvida pelos autores, a qual em conjunto com um ábaco (Figura 13) fornece um valor de resistência ao rolamento da via em questão.

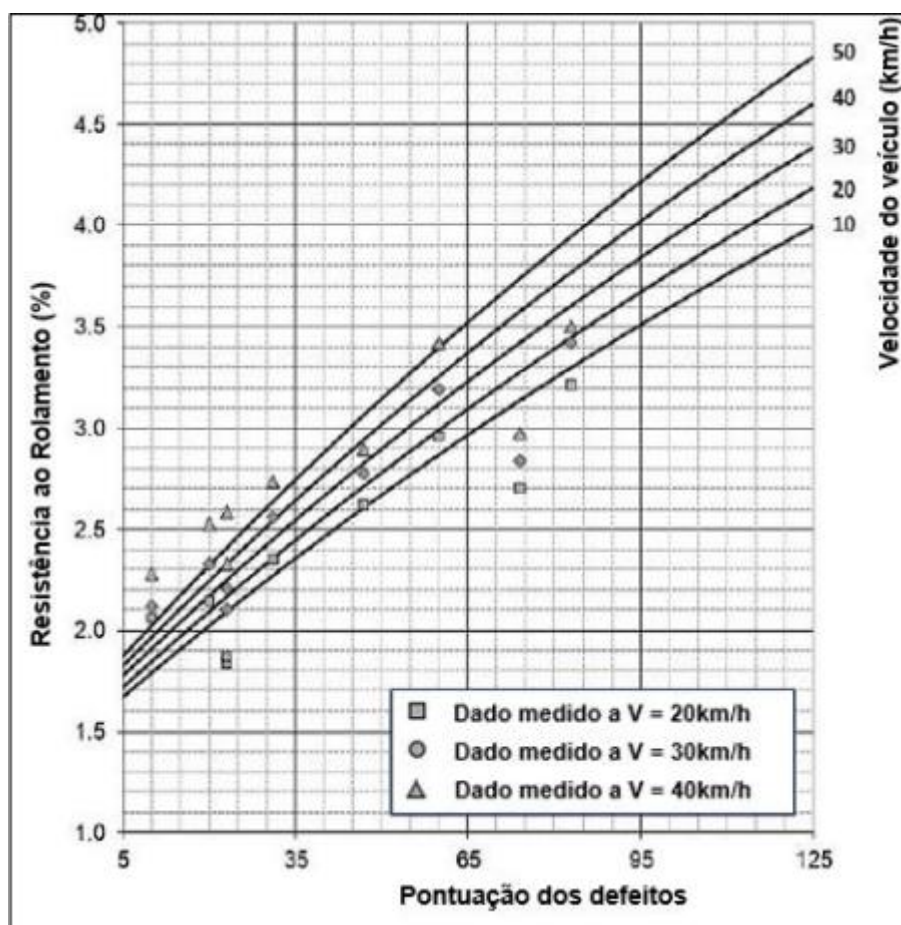


Figura 13 – Âbaco para estimativa da resistência ao rolamento de acordo com velocidade de tráfego e pontuação obtida pela avaliação visual dos defeitos.

Fonte: Adaptado de Thompson, Peroni e Visser (2019)

## 2.5 Manutenção e Monitoramento de Estradas

### 2.5.1 Manutenção de Estradas

As estradas da mina, mesmo possuindo bons projetos estruturais, muitas vezes necessitam de intervenções recorrentes a fim de manter a qualidade do pavimento e corrigir seu projeto funcional. A manutenção periódica das estradas evita que danos excessivos sejam observados, o que produz melhores condições de tráfego e redução nos tempos de ciclo de transporte, menor custo operacional e aumento da produção, além de aumentar a segurança aos operadores.

As manutenções de rotina de estradas nas operações de mina são geralmente realizadas de acordo com o tipo de defeito a ser corrigido. Porém, algumas atividades mais frequentes incluem (THOMPSON; VISSER, 2003):

- Correção e preenchimento de corrugações: auxiliam na redução da erosão e aumento da drenagem superficial;
- Drenagem e manutenção de bordas de estradas: ajudam a reduzir a erosão e a perda de material das drenagens;
- Nivelamento: serve para redistribuir o material da superfície e no preenchimento de pequenas depressões;
- Aspersão de água: auxilia na diminuição de poeira suspensa no ar, aumentando a segurança das atividades e a produtividade dos equipamentos.

Thompson e Visser (2003) classificam a frequência de manutenção das vias de acesso como reativas (*ad-hoc*), programadas, segundo um sistema de manutenção e manutenção em tempo real. A manutenção reativa, como o nome já deixa claro, é realizada quando já é tarde demais e em um trecho de estrada específico, geralmente após inspeção visual de campo e limitada a disponibilidade e alocação dos equipamentos de manutenção. Manutenções programadas utilizam um cronograma de manutenção fixa, independente do volume de tráfego e quantidade de defeitos na estrada. A manutenção por um sistema de gerenciamento da manutenção (*Maintenance Management System – MMS*) permite uma melhor alocação dos recursos e rotinas de manutenção pois analisa criticamente a rede de estradas de acordo com a quantidade e severidade de defeitos nos seguimentos e volume de tráfego de equipamentos, visando à redução dos custos totais. Por fim, a manutenção em tempo real (*Real Time Maintenance Management System – RT-MMS*) consiste no uso de informações do sistema de despacho, como velocidade dos caminhões, telemetria e análise das informações para definir uma priorização de manutenção em

determinados trechos. A Figura 14 mostra a hierarquia desses sistemas de manutenção de estradas.

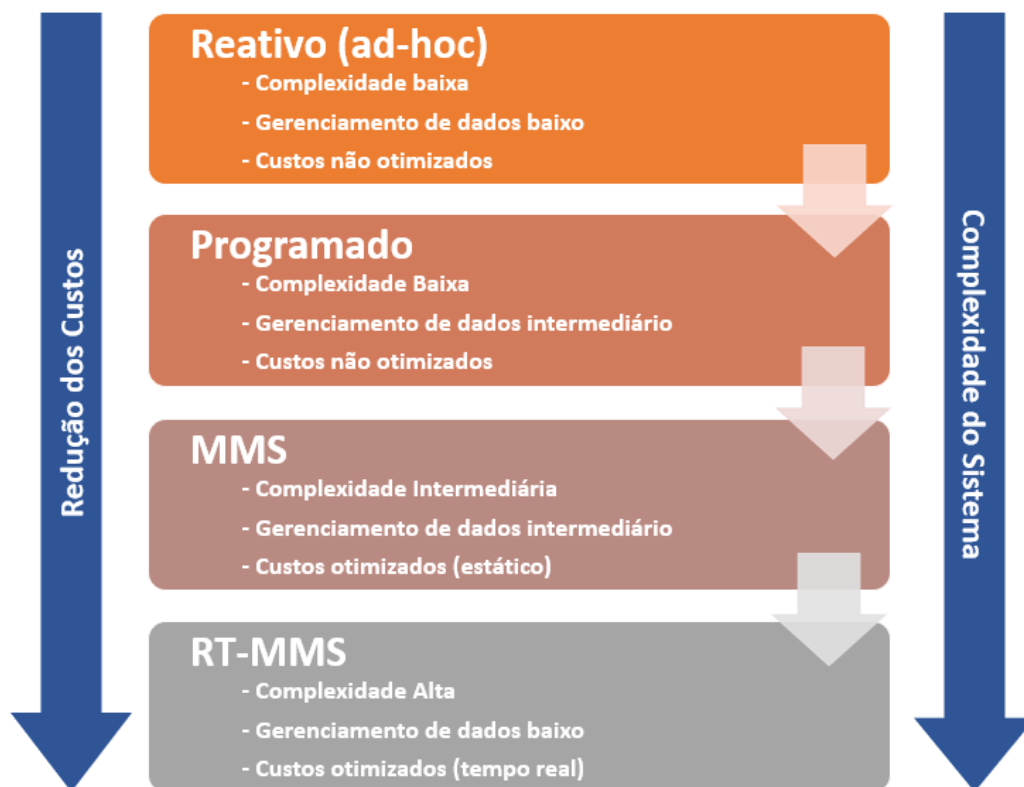


Figura 14 - Hierarquia dos sistemas de manutenção de estradas de mineração.

Fonte: Adaptado de Thompson, Peroni e Visser (2019)

O uso apropriado de uma estratégia para a manutenção da rede de estradas de uma mina tem o potencial de gerar economias significativas. Conforme já mencionado anteriormente, a frequência de manutenção ótima pode ser identificada através da curva de custo total mínimo, onde são adicionados os gastos de transporte com os gastos de manutenção da via. Segundo Thompson, Peroni e Visser (2019), em uma operação de mineração de superfície grande e profunda, os custos de transporte de caminhão podem ser responsáveis por até 50% dos custos operacionais totais incorridos pela mina, como mostrado na Figura 15, que apresenta a distribuição do custo operacional de lavra (e valores aproximados) para uma mina de 250 kt/dia.

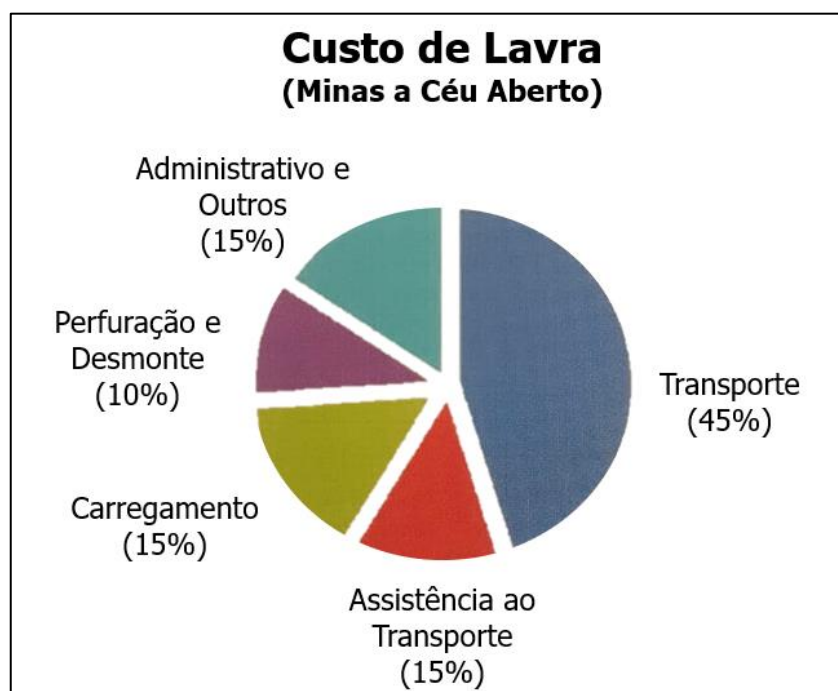


Figura 15 – Distribuição típica dos custos de lavra (250kt/dia e 500m de profundidade).

Fonte: Adaptado de Thompson, Peroni e Visser (2019)

Desta forma, qualquer economia gerada a partir de um projeto e gerenciamento de estradas melhorado beneficia as empresas de mineração diretamente como custo reduzido por tonelada de material transportado.

## 2.5.2 Estimativa de Velocidade de Caminhões

### 2.5.2.1 Resistências

Como já mostrado anteriormente, a resistência ao rolamento é definida como a força que impede que um veículo em movimento se mantenha a uma velocidade constante em solo nivelado e é uma função não apenas da massa do veículo, mas também do tipo e condição dos pneus e da superfície da estrada em que o veículo é operado (THOMPSON; PERONI; VISSER, 2019). Ou seja, o motor do caminhão tem que fornecer mais potência para superar essas resistências adicionais e, quanto maiores



forem essas resistências, mais potência é necessária. A resistência ao rolamento é, em certa medida, uma variável controlável em uma operação de mineração.

Já a inclinação das estradas é tipicamente fixa, sendo função da geometria da mina e da REM. De acordo com Thompson, Peroni e Visser (2019), a inclinação também deve ser selecionada considerando que:

- Baixas inclinações aumentam a distância média de transporte (DMT), mas permitem maiores velocidades;
- Altas inclinações diminuem a distância média de transporte (DMT), mas inibem maiores velocidades.

Semelhante à resistência ao rolamento, a resistência à inclinação é uma medida da força gravitacional que deve ser superada para mover um caminhão contra a inclinação positiva (desfavorável). Da mesma forma, para inclinações negativas, a inclinação é definida como de “assistência” e pode ser chamada de favorável. A resistência total é a soma da resistência ao rolamento e a resistência (ou assistência) pela inclinação, sendo expressa pela Equação 8.

$$RT = RR + RI \quad (8)$$

Onde  $RT$  é a resistência total,  $RR$  é a resistência ao rolamento e  $RI$  é a resistência à inclinação (positiva para situações de aclave e negativa para situações de declive).

A estimativa de velocidade máxima de um caminhão é função da resistência total, sendo tradicionalmente aferida pelas curvas de Rimpull fornecidas pelos fabricantes. Além desse método, outra maneira de calcular a velocidade dos caminhões sem a utilização das curvas de Rimpull foi desenvolvida por Cooper (2008), através de equações para aclave e declive que utilizam especificações dos caminhões, inclinação das estradas e coeficientes específicos da operação. Essas metodologias serão detalhadas a seguir.

### 2.5.2.2 Curvas de Desempenho (Curvas de Rimpull)

As curvas de desempenho dos caminhões, ou curvas de Rimpull, são fornecidas pelos fabricantes para fornecer uma estimativa da velocidade teórica dos caminhões em função da massa do veículo, a força de tração nas rodas do motor e a resistência total. Para um equipamento de carga, existem dois tipos de curvas de Rimpull: propulsão (ao acelerar, em acíves, por exemplo) e retardo (ao frear, em declives, por exemplo). A Figura 16 mostrado exemplos de curva de Rimpull para um caminhão elétrico (motor a diesel).

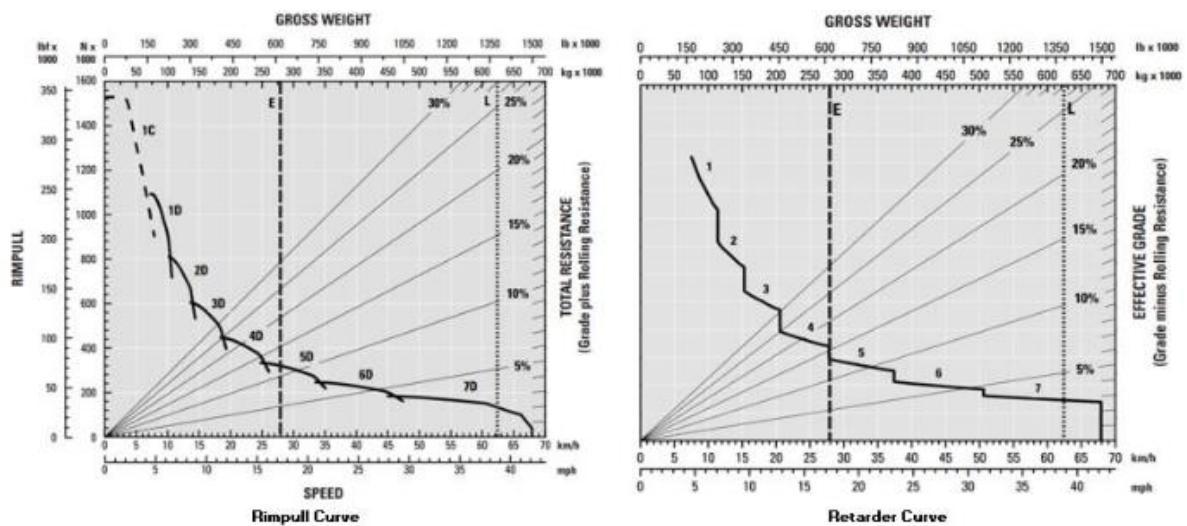


Figura 16 - Curvas de Rimpull de (a) propulsão e (b) retardo para um caminhão elétrico.

Para usar esses gráficos para estimativa de velocidade e, conseqüentemente, tempo de ciclo, as seguintes etapas devem ser seguidas:

1. Determinar qual gráfico utilizar dependendo da operação. Para estimativa de velocidade de subida, usar o gráfico de propulsão; para estimativa de velocidade de descida, usar o gráfico de retardo;
2. Calcular a resistência total (ou efetiva) do trecho, que será a soma da resistência ao rolamento e da inclinação da via;

3. Selecionar a linha da resistência total e seguir até a intersecção com a linha vertical que representa o peso do caminhão (cheio ou vazio são destacados);
4. Projetar horizontalmente até a intersecção com a curva;
5. Projetar verticalmente para encontrar a velocidade do caminhão.

Esse passo a passo é apresentado abaixo na Figura 17, destacando cada um dos pontos mencionados anteriormente. Neste exemplo, foi considerada uma estimativa para um trecho com resistência ao rolamento de 3%, inclinação de 7% - ou seja, resistência total de 10%, para uma condição de subida com caminhão cheio (L – *loaded*).

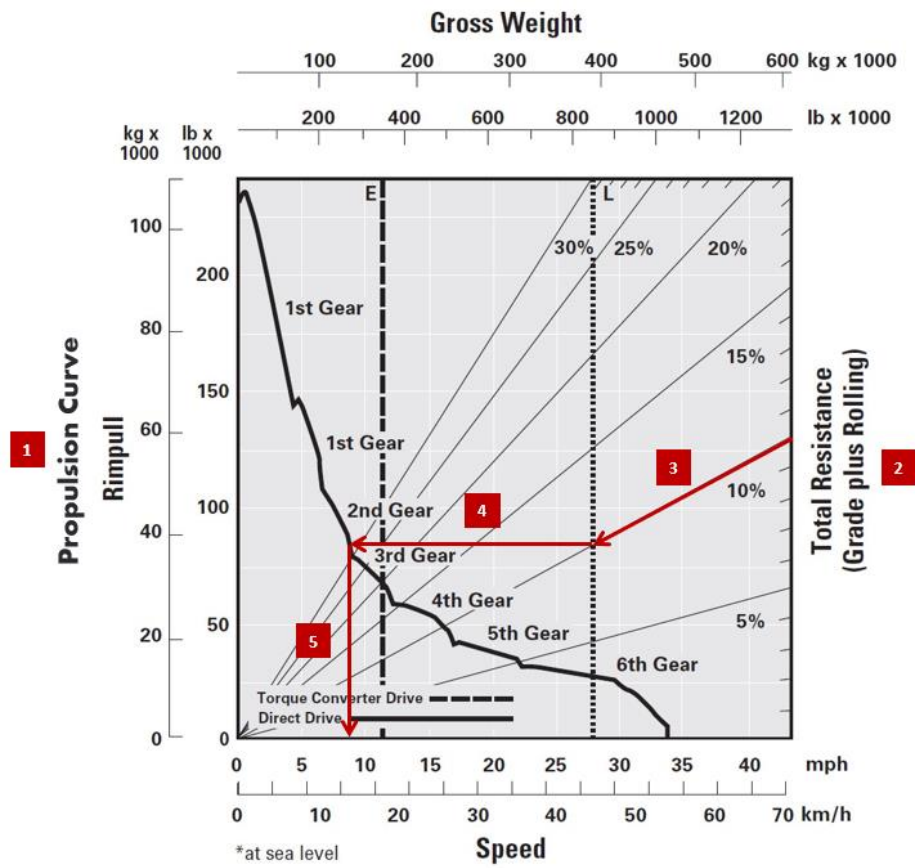


Figura 17 – Procedimento para leitura da velocidade de caminhões usando curvas de Rimpull.

### 2.5.2.3 Modelo de Estimativa de Cooper

Cooper (2008) desenvolveu uma série de equações para determinar rapidamente a velocidade do caminhão sem recorrer a curvas de Rimpull, permitindo uma rápida aproximação da velocidade dos caminhões. Duas equações são propostas: uma para subidas (Equação 9) e outra para descidas (Equação 10).

$$v_{uphill} = \frac{0.367 \epsilon_t P_{Gross} \sqrt{(1 + GR^2)}}{GVM TR} \quad (9)$$

$$v_{downhill} = \frac{-0.367 \epsilon_r P_{Gross} \sqrt{(1 + GR^2)}}{GVM TR} \quad (10)$$

Onde  $P_{Gross}$  é a potência do motor (kW),  $\epsilon_t$  é um fator de eficiência de transmissão,  $\epsilon_r$  é um fator de eficiência de retardo,  $GVM$  é a massa do veículo (t),  $GR$  é a inclinação da estrada e  $TR$  é a resistência total (%)

O  $GVM$  é selecionado com base no status de carregamento do caminhão (vazio ou cheio), a potência do motor está normalmente disponível nas especificações dos equipamentos e a inclinação e resistência total são características das estradas. De acordo com Cooper (2008), fatores de eficiência de transmissão de 80% e uma de eficiência de retardado de 115% funcionam bem para a maioria dos cenários, porém estes devem ser selecionados os modelos de acordo com cada operação.

### **2.5.3 Sistemas de Despacho**

Na mineração, os sistemas de monitoramento da frota, ou sistemas de despacho, são amplamente utilizados com o objetivo de gerir e monitorar a produção e a operação em tempo real. Segundo Thompson, Peroni e Visser (2019), os sistemas de despacho evoluíram a partir da década de 1970, quando eram utilizados aplicativos simples e pouco recursos computacionais, passando pelo simples uso do rádio para direcionar os equipamentos, e chegando até os dias atuais com o uso de telemetria e posicionamento em tempo real com GPS.

A Figura 18 apresenta um exemplo de registros de operação de caminhões fora de estrada coletados pelo sistema de despacho e plotados em ambiente 3D utilizando as coordenadas dos registros e a topografia da mina. Cada registro está sendo apresentado com sua velocidade em km/h e a coloração diz se o caminhão está cheio ou vazio (no exemplo, há um filtro sendo aplicado mostrando somente os vazios – coloração verde).



Figura 18 – Exemplo de registros do sistema de despacho plotados com a topografia de mina evidenciando suas velocidades instantâneas na sua localização.

Os dados coletados pelo sistema de despacho podem incluir horas de operação do veículo, telemetria do veículo (rastreamento e diagnóstico), desempenho do motorista, controle de velocidade, consumo de combustível e gerenciamento de segurança. O sistema facilita a identificação de melhorias em eficiência, produtividade e as oportunidades de redução de riscos associados aos equipamentos de mina e para os operadores. Atualmente, em operações de alta produção e baixo custo, é quase impensável tentar gerenciar e otimizar o desempenho operacional sem um sistema de despacho instalado que agrupe e analise os dados da operação (THOMPSON; PERONI; VISSER, 2019).

No que diz respeito aos equipamentos, o sistema de despacho desempenha papel fundamental de reduzir o tempo de ciclo, otimizar o número de caminhões considerando os tempos de mina, aumentar a utilização e aumentar a produtividade.

Isto é feito através de algoritmos que utilizam as informações de localização dos equipamentos por GPS e instrumentação através de equipamentos eletrônicos embarcados, que podem verificar o status dos equipamentos, como por exemplo, velocidade e massa instantâneas.

O sistema de despacho se adequa às necessidades da empresa e da mina, entre elas a demanda por manutenção dos equipamentos e das vias. Nesse âmbito, muitos sistemas de despacho contam também com o monitoramento do desempenho dos caminhões para diagnósticos e tomada de decisões em tempo real. Esses sistemas auxiliam as equipes de infraestrutura de mina na alocação dos recursos de forma mais adequada e precisa. Segundo Teixeira (2016), os sistemas de despacho, quando utilizados para otimizar o sistema de manutenção dos equipamentos, permitem às empresas manter os caminhões e suas peças em bom estado, prever a disponibilidade dos equipamentos e ter uma visão mais ampla dos seus sistemas produtivos, garantindo ação de manutenção preventiva mais acurados e redução de custos.

#### **2.5.4 Real-Time Maintenance Management System (RT-MMS)**

Os dados coletados por um sistema de despacho podem ser usados para melhorar o desempenho não só da frota de caminhões e equipamentos em geral, mas também podem gerar informações úteis para detectar defeitos nos acessos e priorizar as ações corretivas para a equipe de manutenção, como parte de um sistema integrado de gestão de estradas. As informações sobre a velocidade do caminhão, aceleração vertical, paradas não planejadas etc. podem indicar problemas com a estrada e podem até mesmo ser usadas estimar a resistência ao rolamento em certas áreas.

Thompson e Visser (2003) sugerem um sistema de gerenciamento de manutenção em tempo real – *Real-Time Maintenance Management System* (RT-MMS). Este sistema tem como objetivo diagnosticar e tomar decisões em tempo real sobre a manutenção de estradas utilizando dados combinados provenientes da localização (GPS) e operação de caminhões e informações externas (inclinação da via,

imageamento com drone, modelos 3D etc.). Essa integração é apresentada na Figura 19.

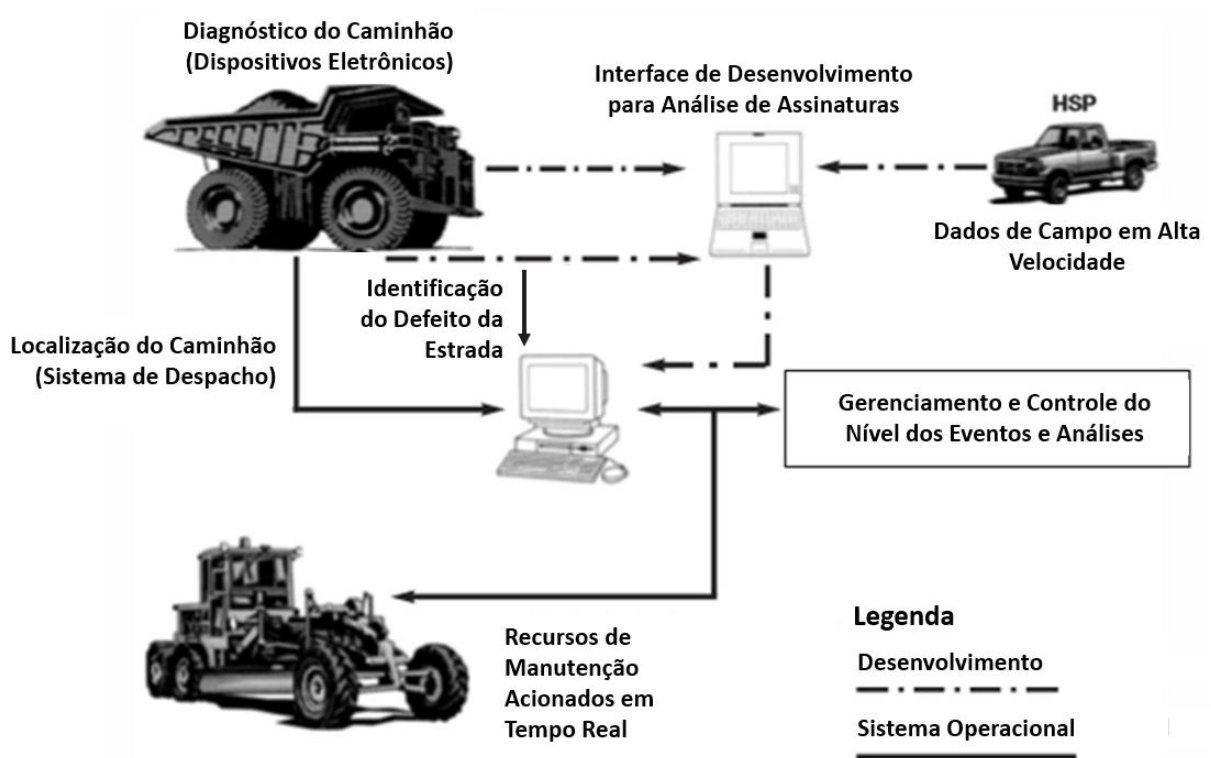


Figura 19 – Sistema de manutenção de estradas em tempo real (RT-MMS).

Fonte: Adaptado de Thompson e Visser (2003)

O RT-MMS funciona da seguinte maneira (THOMPSON; VISSER, 2003):

- Os caminhões fornecem informações de localização e eventos anômalos na sua operação através de dispositivos eletrônicos (GPS, acelerômetro etc.);
- Os dados são recebidos na central de controle e monitoramento da mina;
- Uma análise crítica sobre volume de tráfego e provável tipo de defeitos é realizada;
- A motoniveladora é informada das localizações e prioridade de manutenção das vias considerando proximidade e disponibilidade;
- Ação corretiva é realizada.



O autor cita as diversas vantagens da utilização do sistema em minas a céu aberto que desejam realizar um melhor gerenciamento das suas rotinas de manutenção: evidenciar o uso do sistema para otimização dos processos; melhor alocação dos recursos de manutenção; diagnóstico e respostas rápidas aos problemas encontrados em estradas; históricos desses eventos e possibilidade de análise temporal para melhor previsibilidade de ocorrências; mapeamento de acessos com foco na qualidade do pavimento; correto número de equipamentos de manutenção e possível redução desse tipo de investimento; redução das inspeções visuais; etc.

Thompson, Peroni e Visser (2019) mostram que o uso desse sistema vem se mostrando cada vez mais frequente na mineração para diagnosticar os projetos geométrico, estrutural e funcional das estradas, uma vez que a maioria das empresas de mineração já possuem sistemas de monitoramento de frota instalados e recursos necessários para essa análise. Mais especificamente sobre a qualidade das vias, vários estudos tentaram utilizar dados coletados por sistemas de despacho, telemetria, acelerômetros e modelagem matemática para identificar defeitos nas estradas ou quantificá-la fim de otimizar as rotinas de manutenção em tempo real. Alguns desses trabalhos serão resumidos na próxima seção.

### **2.5.5 Aplicações do RT-MMS**

Hugo, Thompson e Visser (2008) demonstraram que é possível descrever a geometria dos defeitos das estradas através de informações da velocidade do caminhão, do sistema de suspensão do veículo e de modelagem matemática. Essa técnica simulou o perfil do pavimento através de assinaturas, conseguindo identificar com bom grau de precisão defeitos nas estradas, como pode ser visto na Figura 20.

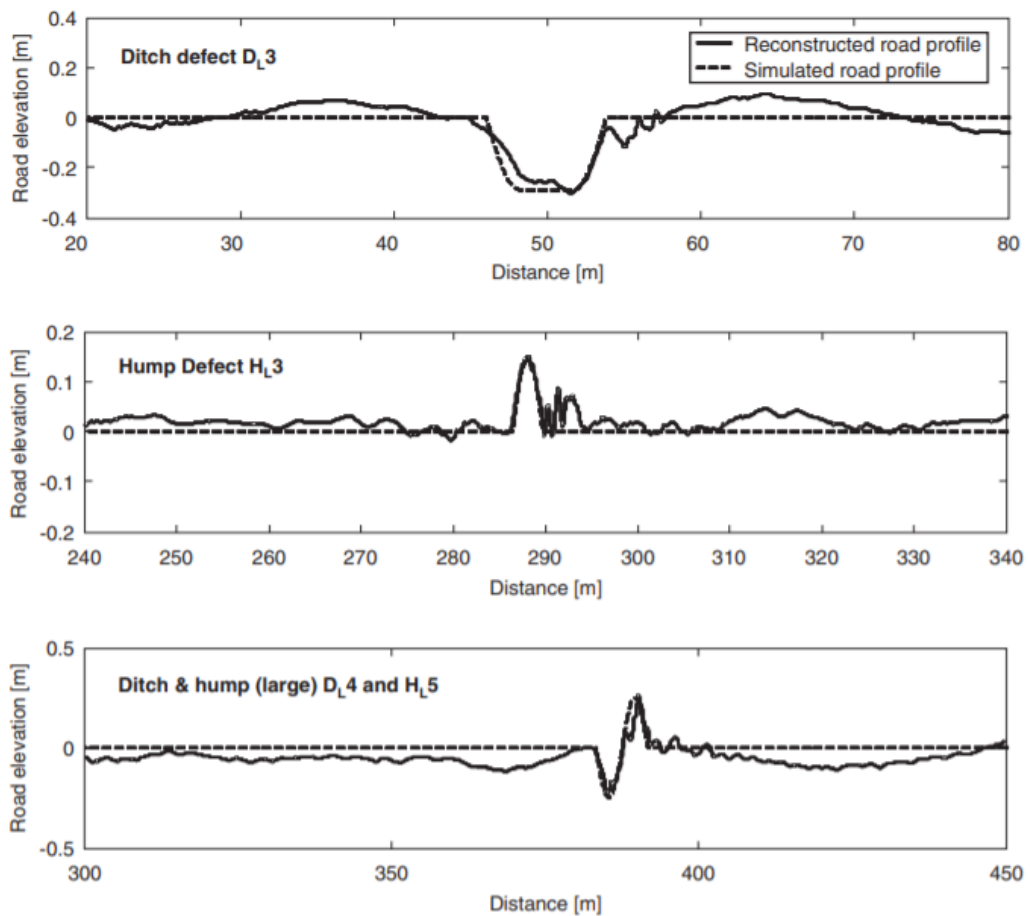


Figura 20 – Defeitos de estradas reconstituídos comparados com geometria real da estrada.

Fonte: Hugo, Thompson e Visser (2008)

Marais, Thompson e Visser (2008) utilizaram registros de velocidade dos caminhões em conjunto com informações de aceleração e frenagem para reconhecer o tipo, tamanho, densidade e localização de defeitos nas estradas. Com essa metodologia, foi possível criar um mapa dos defeitos (Figura 21), o que fornece uma boa indicação de quais estradas deveriam sofrer uma intervenção de manutenção e sua ordem de prioridade.

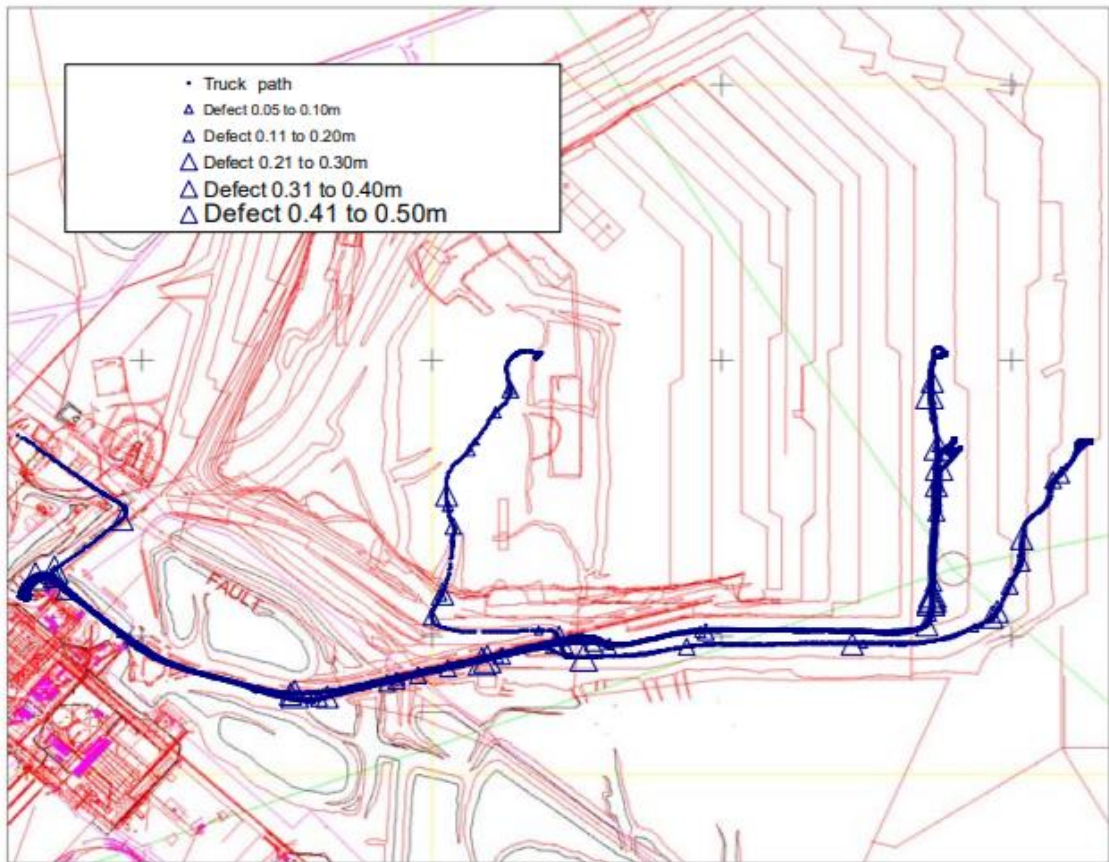


Figura 21 – Mapa de densidade dos defeitos em estradas de mineração (símbolos representam a magnitude do defeito).

Fonte: Marais, Thompson e Visser (2008)

Proof Engineers (2021) desenvolveram uma abordagem para ranquear uma rede de estradas para fins de gerenciamento de manutenção por um sistema de monitoramento (*Road Condition Monitor – RCM*) de baixo custo. Esse sistema utiliza o Índice Internacional de Rugosidade (IRI) obtido pelo RCM em veículos leves, fornecendo um mapeamento completo do estado das estradas por cores, indicando os diferentes níveis de condição da estrada ou severidade dos defeitos, permitindo que os locais de manutenção necessários sejam identificados e a equipe de manutenção da estrada acionada. Este mapeamento é mostrado na Figura 22.



Figura 22 – Mapa de cores indicando qualidade das estradas, onde a escala de cores vai de verde (trechos adequados) até o vermelho (manutenção prioritária).

Fonte: Proof Engineers (2021)

Joseph, Curley e Anand (2017) estimaram a resistência ao rolamento usando cada pneu de um caminhão da mina como um dispositivo de medição, capturando a resposta de pressão do pneu e sua variação ao longo de uma estrada. Através dessa metodologia, foi possível avaliar a deformação do solo, que quando analisada em conjunto com a deformação do pneu, estabelece a área de contato e permite avaliar a resistência ao rolamento. Esse método também gera mapas da resistência ao rolamento das estradas, como o apresentado na Figura 23.

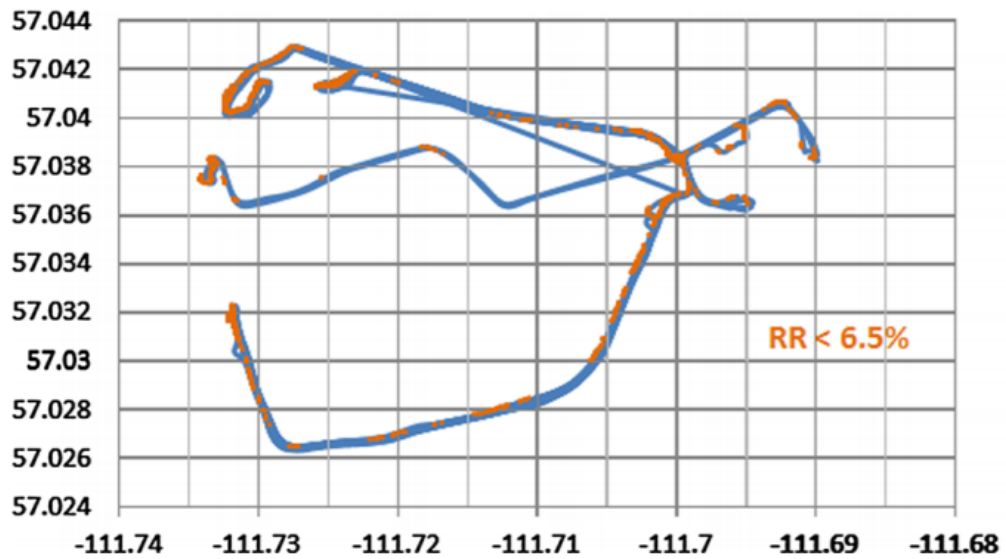


Figura 23 – Mapa indicando resistência ao rolamento baixos e altos em estradas de mineração.

Fonte: Joseph, Curley e Anand (2017)

Thompson (2017) aplicou a abordagem da estimativa por *spline* em curvas de Rimpull de caminhões para prever a resistência ao rolamento da estrada utilizando informações como a posição do caminhão, velocidade em tempo real, aceleração, especificações do equipamento e inclinação das vias. Através desse método, foi possível detectar a resistência ao rolamento média em trechos com características mais contínuas e velocidades mais consistentes. Embora alguma variação na resistência ao rolamento fosse evidente ponto a ponto (Figura 24), a metodologia é capaz de indicar quais partes da rede de estradas necessita de manutenção prioritária por trecho e utilizando o RT-MMS.

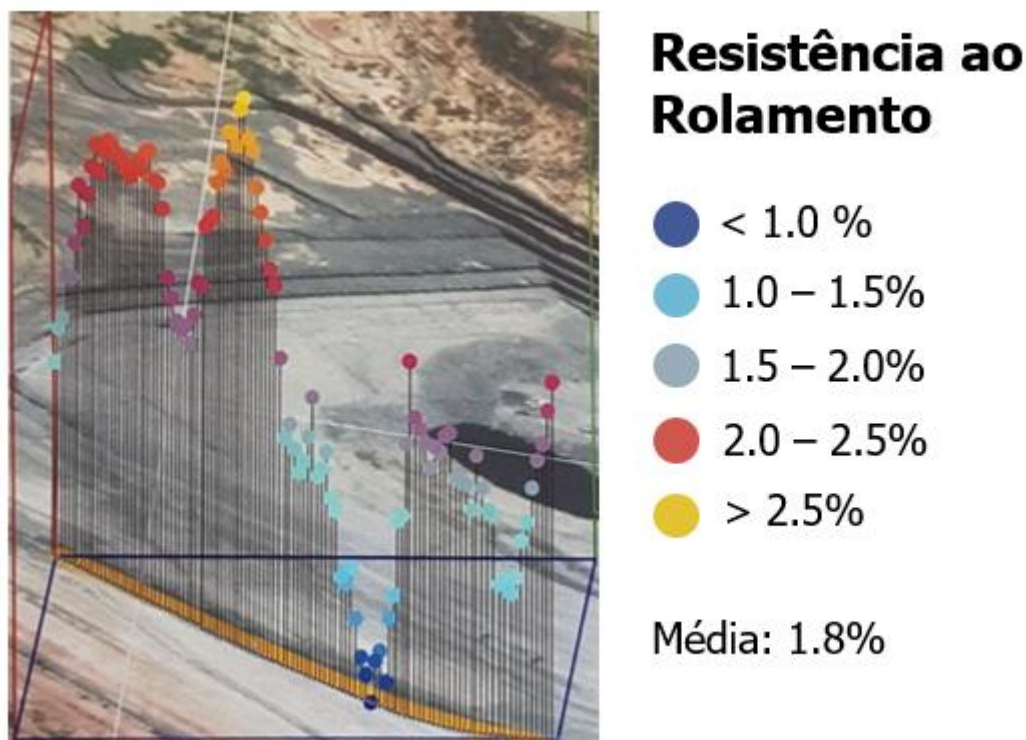


Figura 24 – Estimativa da resistência ao rolamento com RT-MMS para diversos pontos de um trecho de estradas de mina.

Fonte: Adaptado de Thompson, Peroni e Visser (2019)

Komatsu (2021) utiliza um sistema que combina sua tecnologia de controle de máquina inteligente (*Intelligent Machine Control - iMC*) com dados gerados por drones para automatizar trabalhos de construção civil. Neste sistema, sensores de câmera são usados para digitalizar objetos, evitar obstáculos, reconhecer outros equipamentos, realizar medições de volume e criar modelo de fotogrametria em 3D. Segundo Thompson, Peroni e Visser (2019), esse sistema poderia ser facilmente expandido para a construção de estradas de mina com um RT-MMS.

Outras plataformas também possibilitam a construção de modelos 3D do ambiente de mineração - incluindo estradas, com alta resolução utilizando veículos aéreos não tripulados (VANTs). Nesse contexto, a condição do pavimento pode ser avaliada de forma autônoma, de acordo com a tecnologia empregada. Exemplos de aplicações que utilizam esse tipo de abordagem são descritos por Thompson, Peroni e Visser

(2019), como Airware, Propeller Aero, Airobotics, entre outros. A Figura 25 traz um exemplo de avaliação das características de estradas de mina por Delair (2021).

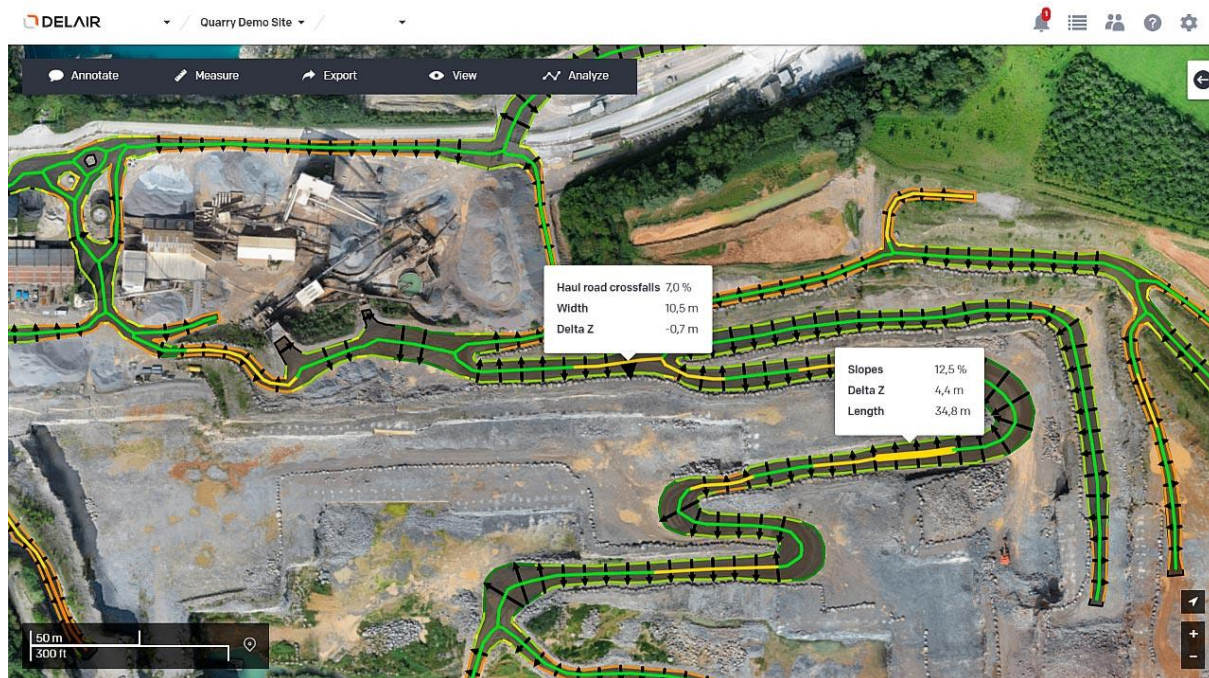


Figura 25 – Características de uma rede de estradas de mina utilizando modelo 3D.

Fonte: Delair (2021)

A chave para todos os sistemas RT-MMS é a análise da condição da estrada e seu impacto nos custos totais. Tendo em vista que a grande maioria das grandes minas operam utilizando caminhões fora de estrada com dispositivos que analisam o status do equipamento de diferentes maneiras, é evidente que as condições das estradas podem ser monitoradas em tempo real pelo sistema de despacho, seja com metodologias mais simples, até as mais complexas e automatizadas. Uma vez que as condições da estrada são recebidas, identificadas e ponderadas pelo volume de tráfego, gravidade da condição etc., equipamentos de manutenção podem ser adequadamente alocados de acordo com um grau de prioridade.

## CAPÍTULO 3 - INTEGRAÇÃO DOS ARTIGOS

A presente dissertação é composta pelos seguintes artigos publicados em periódicos internacionais:

- Artigo 1: ALEGRE, Douglas; PERONI, Rodrigo; AQUINO, Eduardo. The impact of haul road geometric parameters on open pit mine strip ratio. **REM-International Engineering Journal**, v. 72, n. 1, p. 25-31, 2019.

<https://doi.org/10.1080/25726668.2021.1935098>

- Artigo 2: ALEGRE, Douglas; PERONI, Rodrigo; AQUINO, Eduardo; DILLE, Felipe. A method to assess haul roads rolling resistance using dispatch system data. **Mining Technology**, p. 1-12, 2021.

<https://doi.org/10.1590/0370-44672018720136>

O artigo 1 está publicado no periódico *REM - International Engineering Journal* e o artigo 2 está publicado na *Mining Technology* (TIMM A), ambos seguindo o estilo de formatação exigidas pelos periódicos. A seguir, os artigos serão apresentados no formato original de publicação de cada periódico e no idioma de publicação (inglês), garantindo a integridade das informações e confiabilidade do trabalho apresentado no modelo de dissertação escolhido. A seguir, será apresentado breve resumo dos principais resultados obtidos em cada artigo.

### 3.1 Artigo 1

Este artigo, publicado no periódico *REM - International Engineering Journal*, teve como objetivo analisar os impactos na relação estéril-minério (REM) quando variados parâmetros geométricos dos acessos em dois tipos de depósitos: um verticalizado e outro mais horizontalizado. O estudo conduzido por Alegre, Peroni e Aquino (2019) concluiu que mudanças estratégicas no projeto geométrico dos acessos podem afetar



o ângulo de talude global da cava final e as quantidades de estéril e minério da cava final – e conseqüentemente a REM.

Os resultados mostraram que um incremento de 2% na inclinação longitudinal dos acessos contribuiu para uma redução na REM de 1,08% para cavas mais horizontalizadas, e de até 4,15% em uma cava mais profunda e verticalizada. Já o aumento da largura da pista, diminuição da inclinação longitudinal e inclusão de *switchbacks* elevou os valores da REM para os dois tipos de cava final. Isso se deve à diminuição do ângulo global de talude e conseqüente adição de blocos de estéril para a cava final.

Essas variações são importantes no segmento da mineração, onde se tem como objetivo a geração de lucro através de um planejamento estratégico. A diminuição na REM terá impacto positivo no fluxo de caixa do projeto, contribuindo para a maximização do VPL. Tendo em vista que muitas empresas do segmento da mineração estão em constante otimização do seu plano de lavra, o estudo se mostra de grande contribuição para a indústria no que diz respeito à valorização financeira de projetos mineiros.

### **3.2 Artigo 2**

Este artigo, publicado no periódico *Mining Technology (TIMM A)*, teve como objetivo estimar a resistência ao rolamento de segmentos de estrada de mina considerando a inclinação longitudinal das vias e os registros de velocidades coletados pelo sistema de despacho. Esses dados foram utilizados por Alegre *et al.* (2021) em um retro cálculo aplicado inicialmente nas curvas de Rimpull dos caminhões, e posteriormente na interpolação de mapas de resistência ao rolamento utilizando e ajustando as equações desenvolvidas por Cooper (2008).

Este estudo concluiu que a resistência ao rolamento pode ser estimada usando dados do sistema de despacho dentro de segmentos de estradas. A abordagem de retro cálculo usando curvas Rimpull forneceu uma estimativa razoável para a resistência

ao rolamento em qualquer condição de deslocamento dos caminhões (subida, plano ou descida). Essa estimativa possibilitou o ajuste de coeficientes utilizados nas equações de Cooper, prevendo a resistência ao rolamento para uma variedade de pontos e fornecendo uma avaliação local onde existisse informações da inclinação da via e dados do despacho.

A interpolação desses valores foi utilizada para criar mapas de resistência ao rolamento e melhor avaliar as condições das estradas localmente. Considerando que as empresas de mineração estão continuamente tentando identificar a melhor rotina de manutenção dos acessos, o estudo forneceu uma ferramenta valiosa para o monitoramento da qualidade das estradas.

O uso dessa metodologia pode auxiliar na identificação em tempo real (ou dependendo da disponibilidade dos dados despacho) de problemas nos acessos de minas e na avaliação da qualidade das estradas. Como consequência, a rotina de manutenção mais assertiva pode melhorar consideravelmente o desempenho dos caminhões (aumento de velocidade, diminuição do tempo de ciclo, redução de manutenção corretiva etc.), otimizar a alocação de equipamentos de manutenção e reduzir os custos operacionais.

### **3.3 Integração**

As publicações apresentam abordagens específicas sobre 2 componentes dos projetos de estradas na mineração explorados com detalhes na revisão bibliográfica: o projeto geométrico e a resistência ao rolamento. Apesar de possuírem conteúdos próprios, ambos os artigos estão correlacionados por fornecerem avaliações importantes e complementares em relação ao projeto de estradas, com o objetivo comum de reduzir custos e aumentar a produtividade da operação de mina. A integração dos artigos pode ser percebida pelo objetivo em comum das metodologias, que foi desenvolver avaliações nas estradas (projeto geométrico e resistência ao rolamento para os artigos 1 e 2, respectivamente) com foco na redução de custos e valoração do projeto.

O Artigo 1 trata de comparar geometrias ótimas de estradas com o intuito de reduzir a relação estéril-minério, o qual está diretamente relacionado com os custos de lavra e retorno do investimento nas avaliações de curto a longo prazo. O estudo mostrou que algumas geometrias, como o uso de *swithbacks*, larguras de rampa excessivas e inclinações de estradas reduzidas são prejudiciais para a cava, pois diminuem o ângulo de talude global e, conseqüentemente, adicionam estéril em excesso para a cava. Tendo em vista que a REM é um parâmetro utilizado para avaliar a eficiência geométrica da cava, o uso de inclinações maiores e larguras menores pode auxiliar em menor movimentação de estéril, o que irá reduzir os custos de lavra e auxiliar no retorno do investimento.

Já o artigo 2 propõem uma metodologia aplicada diretamente nas rotinas de manutenção das estradas, priorizando uma avaliação semiautomatizada que pode ser aplicada em tempo real com informações já coletadas por grande parte das empresas – os dados de despacho de mina. Com a informação em praticamente tempo real das velocidades dos caminhões, foi possível estimar a resistência ao rolamento dos acessos de mina. Tendo em vista que a resistência ao rolamento é um parâmetro que define a qualidade das estradas, o artigo 2 se mostra capaz de sugerir uma melhor alocação dos equipamentos utilizados para manutenção das estradas ao mesmo tempo que garante melhores condições de tráfego dos caminhões. O aprimoramento do projeto funcional das estradas é capaz de aumentar a velocidade, diminuir o tempo de ciclo dos caminhões e aumentar a produção, o que conseqüentemente vai reduzir o custo de lavra e aumentar a receita.

A análise dos dois trabalhos conjuntamente permite entender o impacto que o projeto de estradas tem na eficiência operacional e custos em lavra a céu aberto. Cada artigo utilizou um estudo de caso com um tipo de minério diferente, mostrando a adaptabilidade das metodologias em diferentes situações. Os dois artigos apresentados fornecem avaliações relativamente simples e replicáveis que podem levar a um melhor projeto geométrico e funcional das estradas, ambos elementos complementares no que visa a otimização do projeto de estradas (em conjunto com o

projeto estrutural). O estudo em questão é de grande importância uma vez que, dentre os diversos tipos de elementos que compõem o custo de lavra, o projeto de estradas possui caráter mais flexível e de fácil ajuste.

# The impact of haul road geometric parameters on open pit mine strip ratio

<http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672018720136>

Douglas Alexandre Gonçalves Alegre<sup>1,2</sup>

<http://orcid.org/0000-0001-6257-872X>

Rodrigo de Lemos Peroni<sup>1,3</sup>

Eduardo da Rosa Aquino<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS,  
Departamento de Engenharia de Minas,  
Porto Alegre - Rio Grande do Sul - Brasil.

E-mails: <sup>2</sup>[douglasaga@hotmail.com](mailto:douglasaga@hotmail.com), <sup>3</sup>[peroni@ufrgs.br](mailto:peroni@ufrgs.br),  
<sup>4</sup>[eduardoaquino.aquino@gmail.com](mailto:eduardoaquino.aquino@gmail.com)

## Abstract

The aim of the study was to analyze the impact on the strip ratio (SR) through varying haul road geometric parameters in two types of deposits, namely one with a steeper dip and a second one with a more equidimensional horizontal behavior. The SRs and the overall slope angle were compared with a base scenario, where the results show an increase in the SR when: (a) the width of the haul roads was increased; (b) the longitudinal grade of the road was decreased; and (c) switchbacks were added. The increase in the longitudinal grade of 2% was considered the best-case scenario, resulting in 1.08% decrease in the SR for the horizontal deposit and in a 4.15% decrease for the vertical one. It was also noticed that the SR variations are inversely proportional to the overall slope angle variations, illustrating the important role that the geometric design of the haul roads has in the return on capital.

**Keywords:** haul road design; strip ratio; overall slope angle; pit design.

## 1. Introduction

One of the main tasks within strategic mine planning is the operational pit design, aiming to maximize the return on investment. The haul road design is an essential element of the final pit, typically composed of geometric, structural and functional aspects (Thompson and Visser, 1997). In open pit excavations, the geometric design is directly related to the mass of ore and waste being hauled, and thus it is important to critically analyze the relationship between all the variables involved in the process of haul road design and the effects that it may have on the economic outcome of the final pit.

According to Hustrulid *et al.*

(2013), the strip ratio (SR) is defined as the mass of waste that needs to be removed to release a unit mass of ore. The variation of SR values is due to the alteration of certain design parameters of the pit, among them the overall slope angle, which can release or block the ore located to the final pit, as well as increase or reduce the waste mass (Wyllie and Mah, 2014). It is intuitive that the flatter the overall slope angle, the greater the mass of waste being removed to access the ore. Thus, when measuring this value as a function of the geometry of the deposit and the final pit design with the incorporation of roads, it is necessary to understand

the consequences of decisions taken in the planning stage. For example, an increase in SR and mining costs may invariably penalize the cash flow and the net present value (NPV) of the project (Frith and Colwell, 2011).

Typically, production is hauled by trucks and to reach the bottom of the pit, it is necessary to use access ramps. Thompson (2011) stated that the main objective of haul road geometric design is to ensure that the trucks can travel the shortest possible distance with the maximum speed, leading to shortest time and guaranteeing the safety of the operation. The main geometric elements of open pit haul roads can be seen in Figure 1.

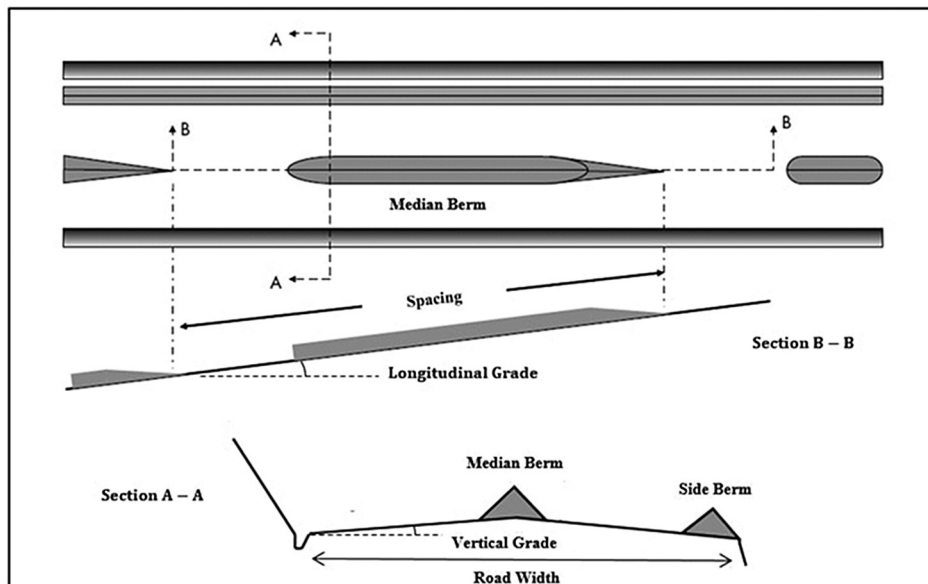


Figure 1  
Geometric elements of haul roads in mining operations (Thompson, 2011).

During the planning or production phases, there may be a need for changes in the geometry of haul roads because of operational adaptations, such as fleet replacement, addition of safety elements (e.g. central berms), elevation of lateral berms, etc. Among the various geometric parameters that are affected by these changes are width, longitudinal grade and the need to add switchbacks. As the variation of these elements affect the overall slope angle - and consequently the SR, it becomes important that these changes are planned and analyzed with special attention to evaluate the impacts in the project (Hustrulid *et al.*, 2013).

Therefore, the dependence relationship between the SR, the overall slope angle and the haul road geometry is evident. The magnitude of economic implications when varying these parameters differs according to the deposit and the operational pit generated. For example, Sullivan (2006) showed that a decrease in the overall slope angle by 5° for a medium-size open pit operation using haul roads can result in a 20% reduction in the costs associated with mining. However, no studies have been found that compare these variations for different deposits and scenarios with different road geometries.

Consequently, the objective of this paper is to evaluate the impact on the SR when varying the geometric parameters of the final pit haul roads for two different types of deposits. The article first presents the operational and geometrical parameter and the variables being studied. Thereafter the analysis is performed for a range of parameters and discussed. Finally, the conclusions are presented and show the significant effect of haul road properties on the economic feasibility for different mine pit configurations, and is thus an issue that must be considered during the initial mine planning stage.

## 2. Material and methods

In order to evaluate the consequences of the variation of haul road geometric pa-

rameters, two types of deposits with different dimensions were selected, one more vertical

and the other more horizontal, as shown in the cross sections presented in Figure 2.

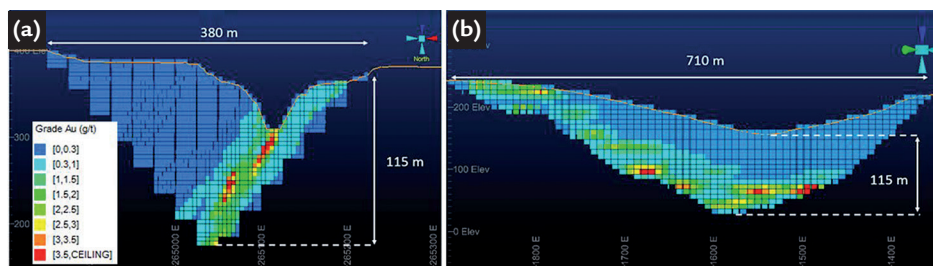


Figure 2  
Block models sections for (a) vertical (I) and (b) horizontal (II) deposits.

Table 1 presents the information about the dimensions of the blocks used

for each type of deposit, as well as the total number of blocks.

	Deposit I	Deposit II
Block dimension X (m)	15	8
Block dimension Y (m)	15	8
Block dimension Z (m)	5	8
Total Blocks	1.402.155	301.110

Table 1  
Information about the block models used in the study.

The optimum pits were generated using the NPV Scheduler® software, which resulted from the maximization of NPV through the Lerchs-Grossmann

optimization algorithm (Lerchs and Grossmann, 1965; Tolwinski and Underwood, 1996). Several alternative pit designs were generated using

the Studio OP® software. The geometric parameters used in the analysis for each deposit are presented in Table 2.

	Deposit I	Deposit II
Geometry	Vertical	Horizontal
Face Angle (°)	70	70
Berm Width (m)	6	6
Bench Height (m)	10	8

Table 2  
Geometric parameters used to generate the operational base pits.

For each type of deposit, different scenarios were generated by varying the geometric parameters of the haul roads of a base pit, as well as the addition of switchbacks with different

radius of curvature. The variation of the parameters was not additive, as can be observed in Table 3 where the alternative layouts are designated A to E, which shows the values used

for each distinct scenario. Since no operational information was provided (e.g. type of haul truck, production, etc.), usual values were used for the parameters.

Scenario	Road Width (m)	Longitudinal Grade (%)	Switchback Radius of Curvature (m)
Base	12	10	-
A	15	10	-
B	12	8	-
C	12	12	-
D	12	10	5
E	12	10	10

Table 3  
Haul road geometric parameters for each scenario.

The overall slope angles of all scenarios were measured using 6 distinct sectors of the pit. The overall slope angle of each pit was then calculated by the

average value of the 6 cross-sections.

Finally, the comparative analysis was carried out by evaluating the percentage differences in SR, in the ore and

waste masses (increased or reduced) and in the overall slope angle of A, B, C, D and E alternatives in relation to the base pit.

### 3. Results and discussion

Figure 3 presents the ultimate pits generated and used for the development of

each scenario where the different haul roads geometries were included in the pit design.

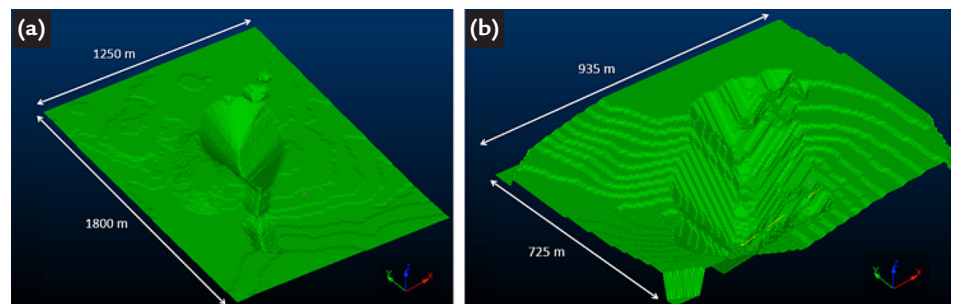


Figure 3  
Optimum pits generated by the NPV Scheduler for (a) deposit I and (b) deposit II.

The automatic generation of operational pits resulted in more than one pit in both situations. In order to standardize the comparison between scenarios, it was

decided to work only with the largest pit observed and the geometric parameters of the smaller pit roads were not modified during the analysis. Figures 4 and 5

show the pits generated in each scenario for the deposits I and II, respectively. The road designs developed are highlighted in orange for each scenario.

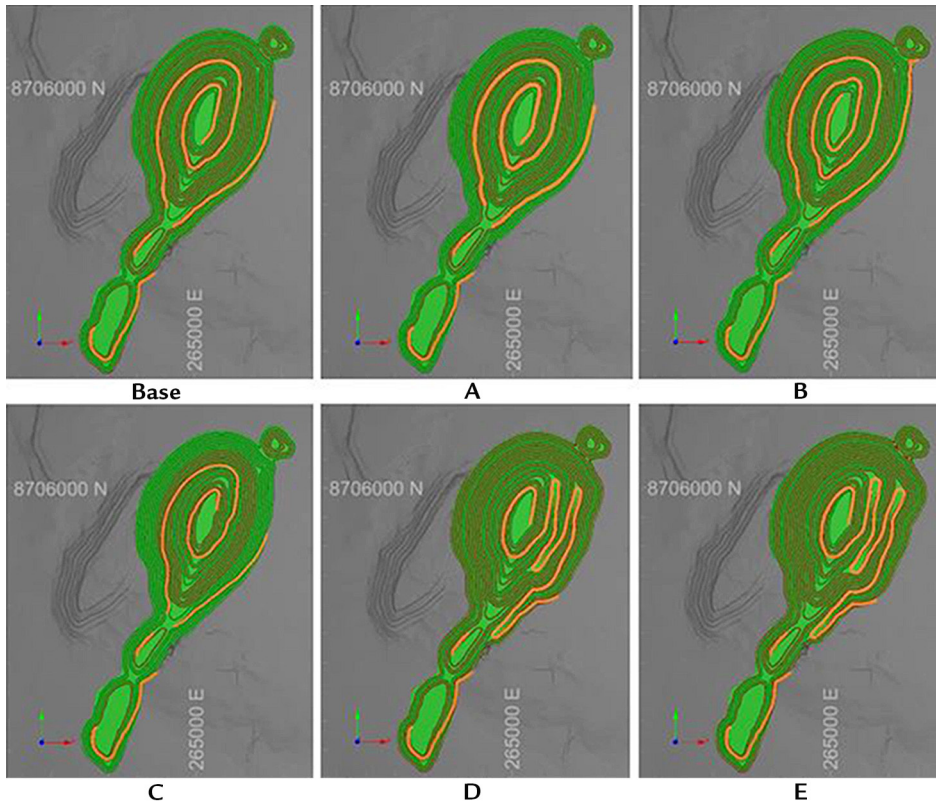


Figure 4  
Pits generated by the Studio OP for each scenario of deposit I.

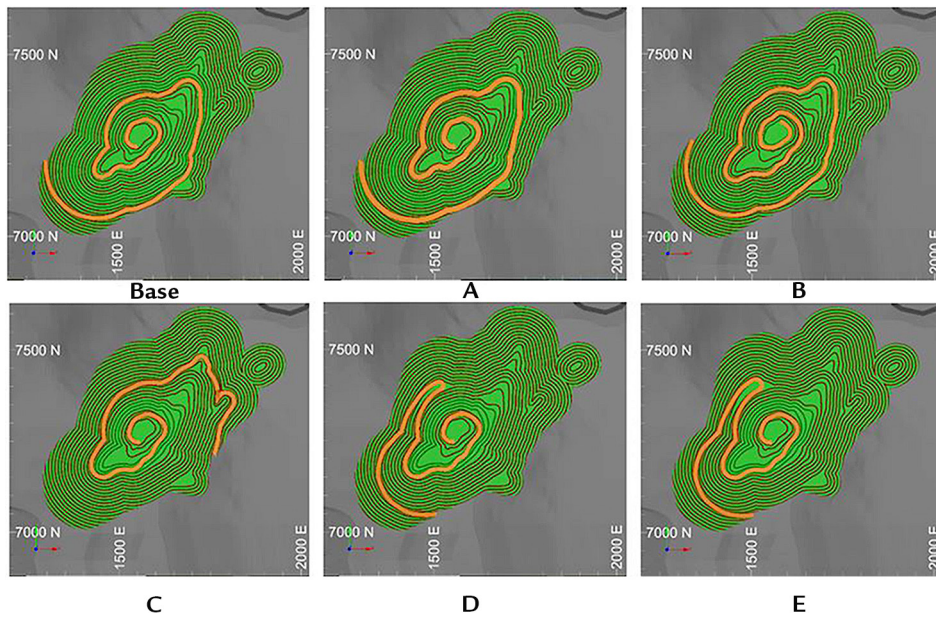


Figure 5  
Pits generated by the Studio OP for each scenario of deposit II.

Figure 6 shows the sections used to calculate the overall slope angle in the scenarios. In each sector, the overall slope angle was measured and the average value

of the 6 sections was used to calculate an average overall slope angle of the entire pit.

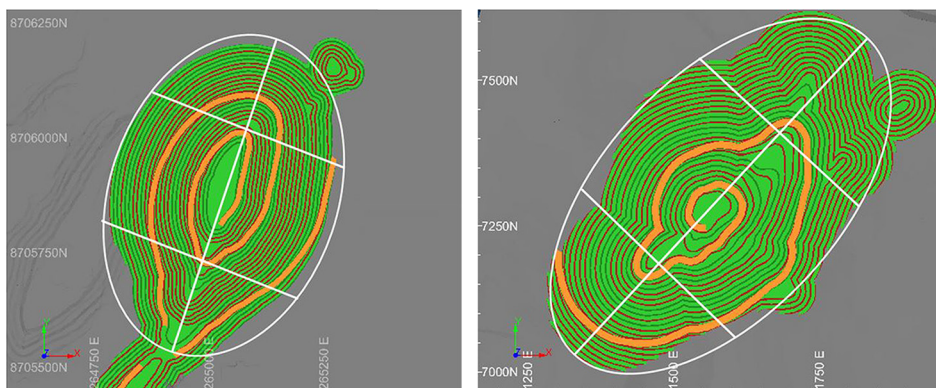


Figure 6  
Sectorization used to calculate the overall slope angle of the pit.

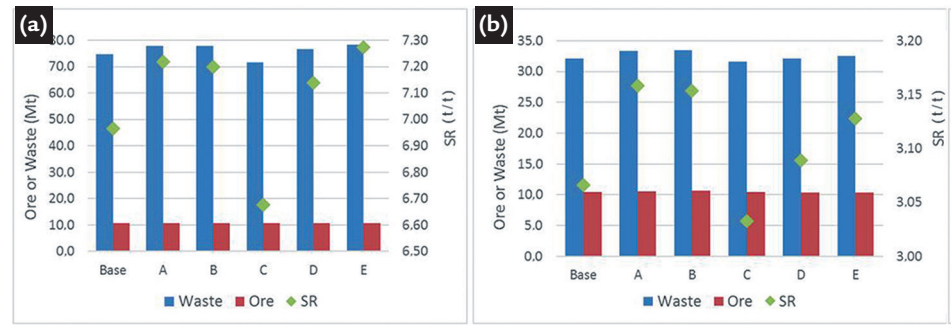


The results showed that in both types of deposits changes in the geometric parameters of the roads impacted

on the masses of waste and ore in the final operational pit. Figure 7 shows the quantitative results obtained from the

generation of the pits and inclusion of the different geometric road designs for deposits I and II.

Figure 7  
Quantitative results of ore, waste, SR for each scenario of (a) deposit I and (b) deposit II.



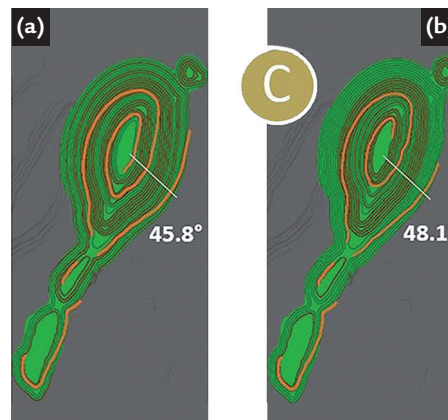
The results also showed that the variations in the amount of waste and ore in the final operational pits presented similar trends in both deposits. Since the amount of ore remained practically steady, it can be stated that the SR is dictated by the amount of waste material.

increase in the waste mass in practically all cases when compared to the base case design, which consequently increased the SR values as well. Scenario C, which corresponds to a 2% increase in the longitudinal grade of the road, was the exception. In this scenario, there was a decrease in the waste mass incorporated into the final pit due to a

lower average haulage distance. This geometrical design reduced the number of road passes in a certain highwall, with a consequent increase in the overall slope angle and reduction of SR, as can be seen in Figure 8, which shows the overall slope angle for the same section in the base pit design and in the alternative scenario C.

While there were slight changes in ore masses, there was observed an

Figure 8  
Overall slope angle for a same section in (a) base pit and (b) scenario C - vertical deposit.

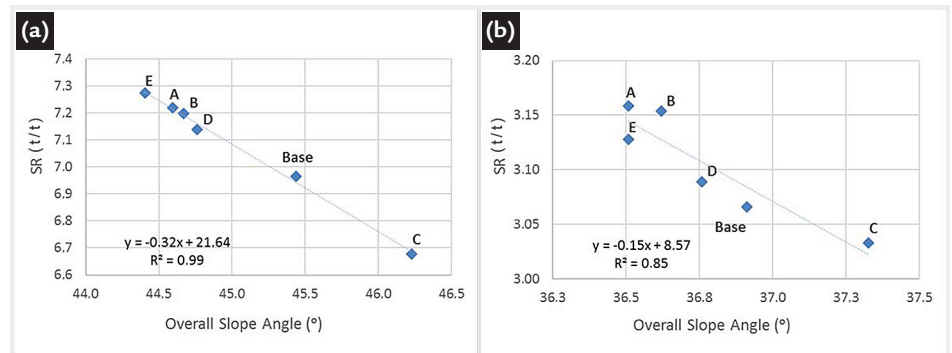


In order to better understand the relationship between the SR and the overall slope angle when varying the

haul road geometric design, linear regression curves were created using all scenarios. Figure 9 shows the behavior

of SR as a function of the overall slope angle for each scenario in the deposits I and II.

Figure 9  
Relationship between overall slope angle and SR for (a) deposit I and (b) deposit II.



The analysis of Figure 9 indicates that these variations in SR are directly associated with the overall slope angles resulting from the operational pits with an inversely proportional relationship between them,

a behavior already observed in other similar studies (Oliveira, 2016). In addition, the figure also shows that this relationship can be extended to similar deposits, allowing the possibility of creating average SR estimates

for hypothetical final pit designs. In this analysis, the overall slope angle was obtained by varying geometric elements in a cross section of the pit using basic trigonometry, as shown in Figure 10.

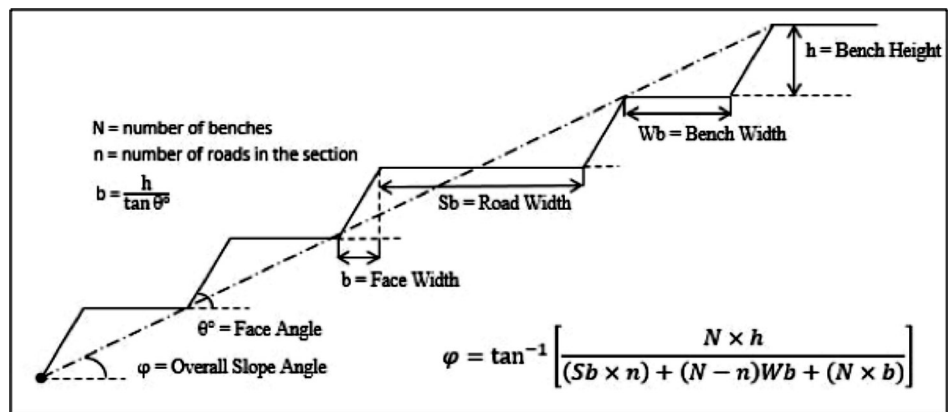


Figure 10  
Elements and equation to calculate the overall slope angle.

The variations are better understood when calculating the percentage differences of waste, ore, SR and overall

slope angle in relation to the base pits, as shown in Tables 4 and 5 for deposits I and II, respectively. The negative values

stand for decrease, and positive values for increase.

Scenario	Waste (%)	Ore (%)	SR (%)	Overall Slope Angle (%)
Base	-	-	-	-
A	3.94	0.28	3.65	-1.86
B	3.94	0.56	3.36	-1.69
C	-4.29	-0.15	-4.15	1.74
D	2.45	-0.04	2.49	-1.48
E	4.62	0.18	4.43	-2.27

Table 4  
Variations in waste, ore, SR and overall slope angle for deposit I.

Scenario	Waste (%)	Ore (%)	SR (%)	Overall Slope Angle (%)
Base	-	-	-	-
A	3.85	0.81	3.01	-1.09
B	4.11	1.21	2.86	-0.79
C	-1.79	-0.72	-1.08	1.12
D	-0.03	-0.77	0.75	-0.42
E	1.23	-0.77	2.02	-1.10

Table 5  
Variations in waste, ore, SR and overall slope angle for deposit II.

It is observed that the variations of the SR were more accentuated for the vertical pit, which is explained by the more significant changes in the overall slope angles because of the deposit geometry and consequently the confinement and depth of the pit.

The increase of road width (scenario A) and the decrease of longitudinal grade by 2% (scenario B) contributed to a slight increase of ore in both cases. However, there is a higher increase in the waste mass, which negatively affected the SR. Hus-trulid *et al.* (2013) stated that wider roads tend to decrease the overall slope angle, which was evident and quantified in the results of scenario A. In scenario B, the reduction of this angle can be explained by the increase in the number of road passes in a cross section, which increases the length of the haul roads to the same depth.

The addition of switchbacks with different radius of curvature (scenarios D and E) did not favor the reduction of SR. The vertical deposit had more expressive additions of waste to the final pit design, which can be explained by its greater depth and the need for a greater number of passes in the same section for the ramp to reach the surface topography. However, the scenario E - horizontalized deposit, seems to be a promising option, since it increased SR at a smaller rate than the other scenarios. In this case, a strategic allocation of switchbacks in an attempt to increase the recovery of ore blocks could prove to be effective. Nevertheless, a better analysis of the economic drawbacks is necessary, since switchbacks increase the haulage costs due to the additional number of curves with a resultant decrease in the speed of the trucks, penalizing the

production and safety (Tannant and Regensburg, 2001).

In both deposits, the increase of the longitudinal grade by 2% (scenario C) produced a negative impact on the masses of ore and waste. In this scenario, the increase in the overall slope angle was due to the decrease in the number of road passes in the same cross section of the pit. However, there were fewer blocks of waste added to the final pit, reducing the SR and providing a best-case scenario in the context of mine planning. It is still important to consider an economic analysis to better understand the consequences that this change can cause in the trucks' cycle times, which is already described in literature and in haul road guidelines for mining (Kaufman and Ault, 1997; Tannant and Regensburg, 2001; Thompson, 2010; Visser, 2015).

## 4. Conclusions

This study concluded that strategic changes in geometric parameters of the haul roads can affect the overall slope angle of the final pit and the mass of waste and ore - and consequently the SR. The results showed that a 2% increase in the longitudinal grade of the road contributed to a reduction in SR of 1.08% for a more horizontalized pit, and up to 4.15% in a deeper and more vertical one. However, the increase in road width, decrease in longitudinal grade and inclusion of switchbacks increased the SR for both deposits, which resulted from the decrease of the overall slope angle and consequent addition of waste blocks to

the final pit.

These variations are important in the mining sector, which aims to generate profit through strategic mine planning. That is because the decrease in SR may have a positive impact on the annual cash flow of the project, possibly contributing to the maximization of NPV. Considering that many mining companies are constantly optimizing their mine plan, the study provides important insights to the industry in terms of financial assessment of mining projects. Further research is planned to continue with the investigation of scenarios, where it is possible to compare the financial gains

resulting from the reduction of SR with possible increases in the cycle time of trucks and/or in operational costs.

The results can be extended to other deposits that have equivalent geometries through the regression curves obtained as a first approximation of the impact in SR for different alternatives of haul road design. However, it is considered that for a higher level of detail, similar studies must be carried out to determine the size of equipment in the early stages of design or in fleet replacement analysis. It is also recommended to carry out a more detailed study to evaluate an optimum scenario as a function of NPV.

## Acknowledgments

The authors would like to thank the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for

sponsoring this research through a master's degree scholarship. We are also grateful to our colleagues and professors from the Min-

eral Research and Mine Planning Laboratory (LPM – UFRGS) who provided insight and expertise that greatly assisted this work.

## References

- FRITH, R., COLWELL, M. Introduction to ground mechanics. In: DARLING, P. (Ed.). *SME mining engineering handbook*, 2011. p. 463-470.
- HUSTRULID, W. A., KUCHTA, M., MARTIN, R. K. *Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack*. CRC Press, 2013.
- KAUFMAN, W. W., AULT, J. C. *Design of surface mine haulage roads*. 1977. (Manual).
- LERCHS, H., GROSSMANN, I. F. Optimum design of open pit mines. *CIM Bulletin*. p. 47-54, 1965.
- OLIVEIRA, B. J. A. L. *Avaliação geométrica do ângulo de talude na delimitação da cava final - estudo de caso: Mina F4, Vale Fertilizantes*. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016. (Trabalho de conclusão de curso).
- SULLIVAN, T. D. Pit slope design and risk— A view of the current state of the art. In: *Proceeding of the Int. Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering Situations*. 2006.
- TANNANT, D., REGENSBURG, B. *Guidelines for mine haul road design*. 2001.
- THOMPSON, R. J. Design, construction, and maintenance of haul roads. In: DARLING, P. (Ed.). *SME mining engineering handbook*, 2011. p. 957-975.
- THOMPSON, R. J., VISSER, A. T. An introduction to the integrated design of surface mine haul roads. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 11, n. 3, p. 115-120, 1997.
- THOMPSON, Roger. Mine haul road design and management best practices for safe and cost-efficient truck haulage. In: SOCIETY FOR MINING, METALLURGY AND EXPLORATION 2010 CONFERENCE PROCEEDINGS PRE-PRINT. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2010. p. 1-10.
- TOLWTNSKI, B., UNDERWOOD, R. A scheduling algorithm for open pit mines. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 7, n. 3, p. 247-270, 1996.
- VISSER, A. T. Haul roads can make money. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 115, n. 11, p. 993-999, 2015.
- WYLLIE, D. C., MAH, C. *Rock slope engineering*. CRC Press, 2014.

Received: 30 August 2018 - Accepted: 6 November 2018.



All content of the journal, except where identified, is licensed under a Creative Commons attribution-type BY.



## A method to assess haul roads rolling resistance using dispatch system data

Douglas Alegre , Rodrigo de Lemos Peroni , Eduardo da Rosa Aquino and Felipe Dille

Mining Engineer, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

### ABSTRACT

Haul roads play a significant role in mining, with rolling resistance being one of the main aspects that can affect road quality and consequently the performance of mining trucks. The aim of this study is to estimate the rolling resistance of haul road segments considering longitudinal grade crossed with dispatch system data using back-calculation from Rimpull curves and estimated performance equations developed by Cooper. The use of this method demonstrated that it could assist in quickly identifying issues on mine haul roads and assess road quality locally through rolling resistance estimated maps, which will help to improve maintenance routines and truck performance.

### ARTICLE HISTORY

Received 9 January 2021  
Revised 8 May 2021  
Accepted 23 May 2021

### KEYWORDS

Haul Roads; Rolling Resistance; Dispatch System; Rimpull Curves; Mining; Road Quality; Haul Trucks; Road maintenance

### Introduction

Haul roads play a significant role in mining operations, considering that all of the production is typically hauled using trucks. When it comes to the variables that can affect the quality of haul roads and consequently the performance of trucks, rolling resistance is one of the most significant parameters (Kaufman and Ault 1977).

A definition of rolling resistance is provided by Tannant and Regensburg (2001), who state that rolling resistance is the combination of forces that a vehicle must overcome to move on a specified surface. It is physically expressed in terms of equivalent longitudinal grade and indicates the quality of haul roads when dealing with unpaved roads in mining. Additionally, total resistance (TR) is the combination of rolling resistance (RR) and grade resistance (GR), as shown in Equation (1):

$$TR = RR + GR \quad (1)$$

The maximum speed of the truck is a function of the TR and is commonly estimated by speed–Rimpull–gradeability curves provided by off-the-road truck manufacturers.

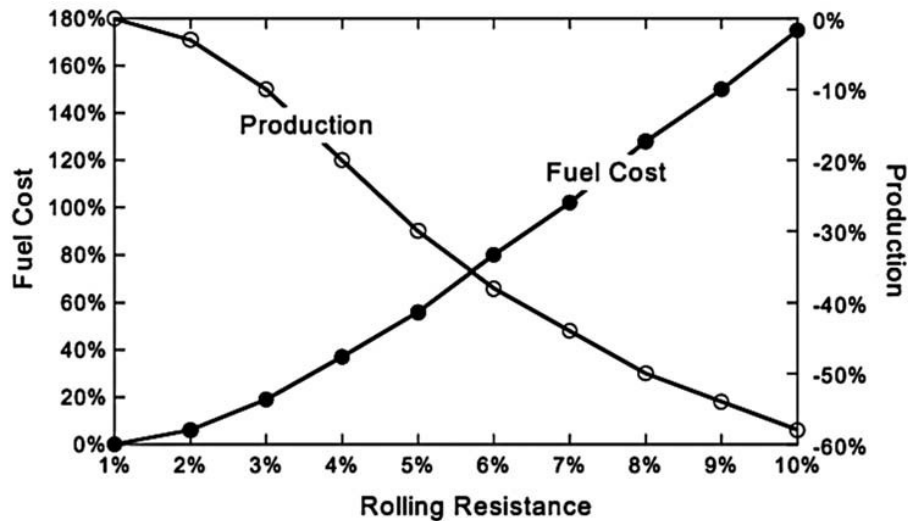
According to Thompson (2011), truck performance is strongly related to rolling resistance. For instance, the author states that for each 1% increase in rolling resistance, truck speed can be reduced by approximately 10% on an uphill ramp and up to 26% on a flat road because of poor conditions of the haul roads. From the economic perspective, Thompson (2011) also states that around 50% of mine operating costs are associated with hauling, which is affected by road quality and, consequently, rolling resistance. Other performance

indicators are also affected by rolling resistance: productivity, fuel consumption, tyre replacement, gas emissions, maintenance, and safety of haul truck operations in surface mines (Soofastaei 2017; Thompson et al. 2019). Figure 1 shows how rolling resistance variation can affect the operational costs arising from increased fuel consumption as productivity decreases.

Regarding the maintenance aspect of the haul roads, Thompson and Visser (2003) proposed a systematic approach, referred to as the maintenance management system (MMS). The main concept is to identify and select an optimal road maintenance frequency considering the minimum total road-user costs, which account for both road maintenance cost and vehicle operating cost (VOC). As can be seen in Figure 2, this approach is also dependent on rolling resistance, proving to be a key factor for the applicability of the MMS.

Although determining rolling resistance is possible with the quantitative and qualitative assessments proposed by Thompson and Visser (2000) using the Roughness Defect Score (RDS), such procedures can be time-consuming and tie up staff capacity to rank the defects of the haul roads. Hence, alternative approaches were suggested by other studies to assess haul road conditions using trucks' on-board data and dispatch systems (Van Staden et al. 2006; Hugo et al. 2008; Joseph et al. 2017; Proof Engineers 2017; Thompson 2017). Dispatch systems are already a common feature of many high-performance mines worldwide, and they are becoming an alternative for evaluating rolling resistance and assisting real-time MMSs (RT-MMS), allowing companies to improve efficiency and productivity and reduce their overall transportation costs.

Therefore, the aim of this study is to indirectly estimate the rolling resistance of haul road segments from

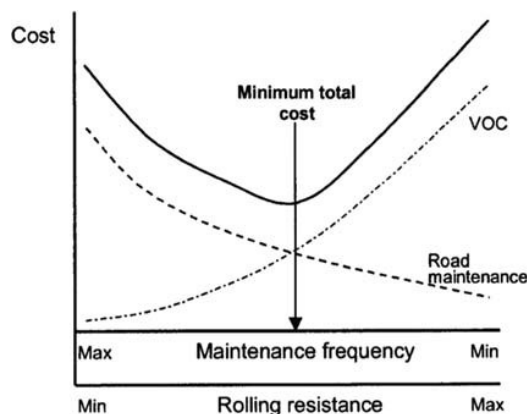


**Figure 1.** Relationship between rolling resistance, production, and fuel cost (Tannant and Regensburg 2001). Images are available in colour online.

the analysis of the road longitudinal grade crossed with dispatch system speed data. The contribution of this study is that it addresses the ability to calculate rolling resistance indirectly through a semi-automated process, using data that are typically collected by the mines but that sometimes are not properly used to produce useful information for decision-making on a real-time basis. Significant benefits can be achieved using this methodology, since identifying and managing the rolling resistance, and consequently haul road quality, is imperative to improve fleet performance and reduce operating costs, from conventional to off-road autonomous trucks.

## Materials and methods

The methodology used to derive rolling resistance values for segments of the road based on trucks' speed records is summarized in Figure 3. The first step was



**Figure 2.** Rolling resistance associated with minimum total cost selection and required road maintenance frequency from VOC and road maintenance cost (Thompson 2011). Images are available in colour online.

to select homogenous segments of the road and representative speed data inside them. Thereafter, the analysis is performed using two approaches: (a) first, back-calculation of rolling resistance using Rimpull curves and then, (b) application of equations developed by Cooper (2008). The output was a rolling resistance map that aims to locally assess the quality of the roads. Following, each step of the methodology is detailed.

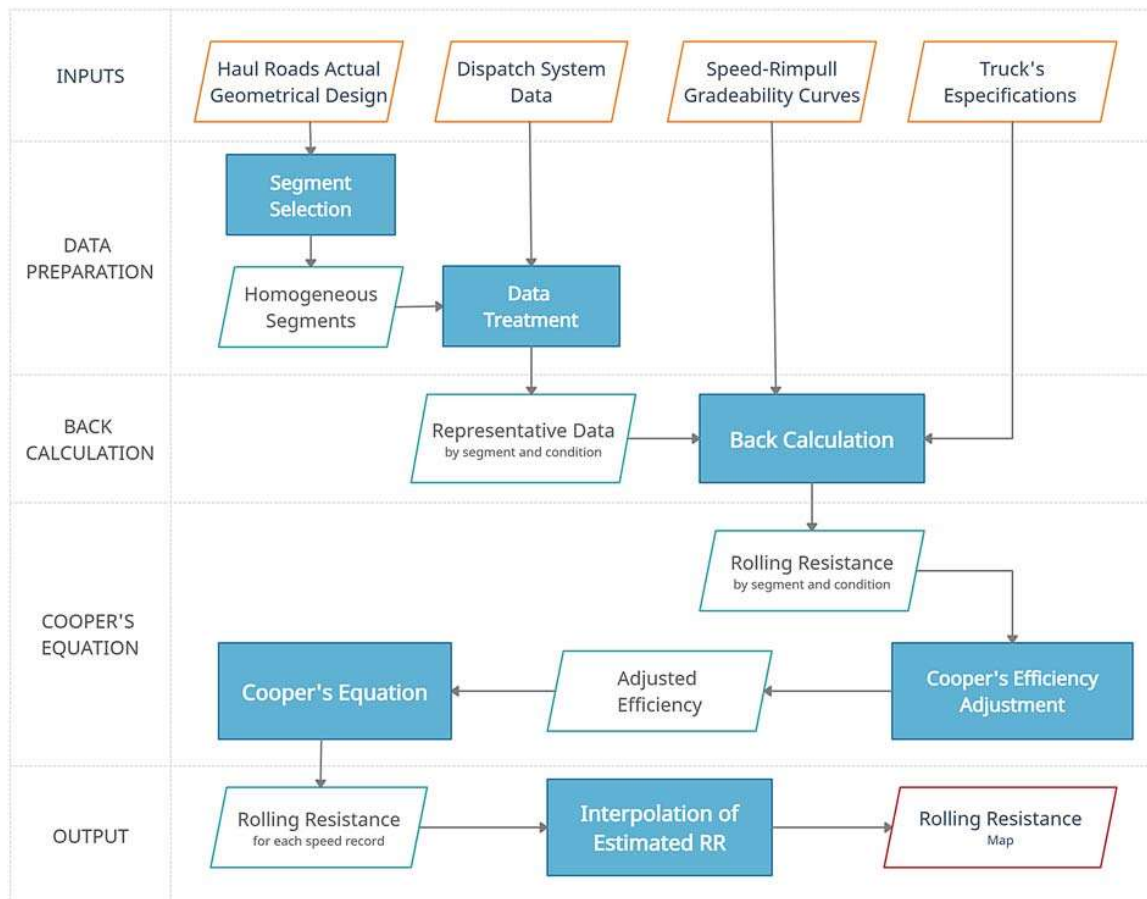
## Initial dataset

The in situ rolling resistance assessments were undertaken using data from an iron ore mining company located in southeastern Brazil. The company provided an initial set of two haul road segments: Western (W) and Eastern (E), where trucks haul the material from the mining faces to the crusher and the road stretches consist of downhill, flat, and uphill segments, as shown in Figure 4.

The company also provided dispatch system data with approximately 665,000 records from a fleet of Komatsu 830E-AC electric-drive trucks. The records were collected in each truck every 30 s from 27 May to 5 June 2020. The data consist of the trucks' x, y and z coordinates, date and hour, instantaneous speed, and payload (empty or loaded). Figure 5 presents the initial non-treated dataset plotted as points, separated into empty and loaded situations and coloured based on speed intervals according to the legend presented in the figure.

## Haul road segment selection

To derive a rolling resistance by back-calculation using speed–Rimpull–gradeability curves, both haul road grade and speed information need to be consistent. To select segments with constant grades, an



**Figure 3.** Methodology flow chart. Images are available in colour online.

evaluation of the longitudinal profile of the roads was performed (Figure 6).

To select a representative sample to calculate the rolling resistance within the segments, speed information needs to present low variability as well. Therefore, a  $10 \times 10$  m grid was created inside the segments, and a distance weighted average estimation was made with the speed records using a search radius of 60 m in X and Y directions – considering the dimensions of the segments. Figure 7 shows the estimated grid using the speed values and further adjustment of the segments to guarantee representative haul road segments to be used in the study.

### Data treatment

A preliminary statistical evaluation was made according to the payload flag (empty or loaded) and segments to check the behaviour of the dispatch system dataset. As can be seen in the histogram presented in Figures 8 and 9, some values associated with inconsistent speeds were found in the initial untreated dataset, such as zeros and extremely high-speed values.

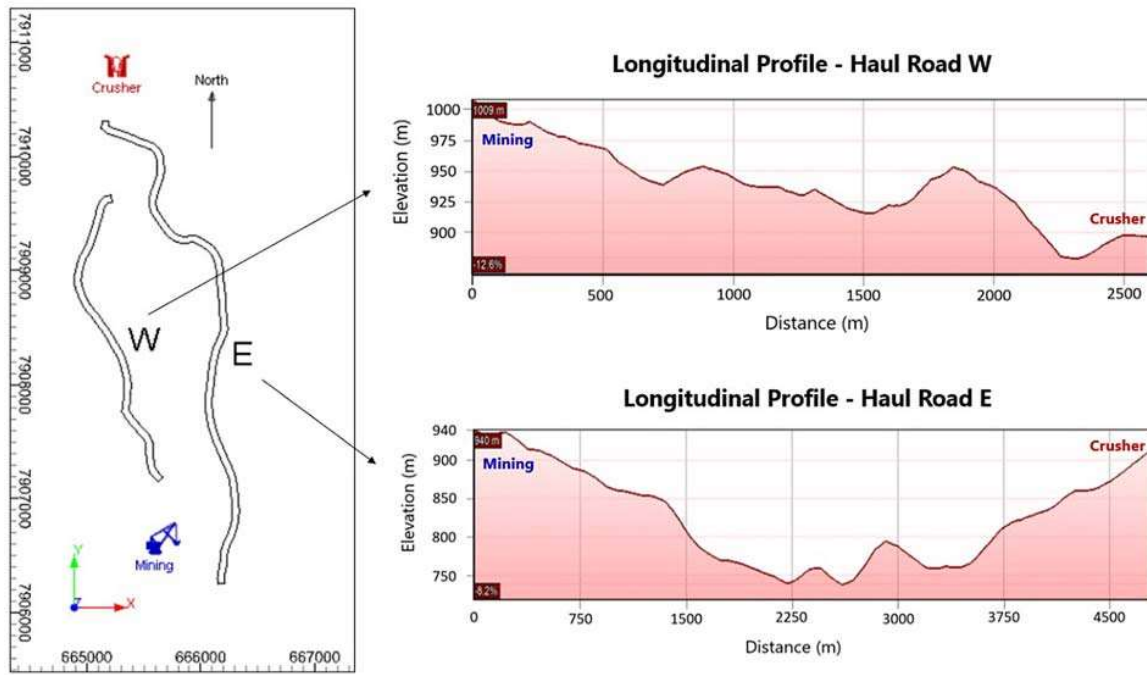
These values are not realistic and could be associated with GPS temporal imprecision or unexpected truck events. Therefore, treatment of the data

provided from the dispatch system was necessary, and the first step was to remove the following values:

- Speeds lower than 5 km/h: zero values are not acceptable, since even high values of rolling resistance would allow some truck movement. However, deceleration to values close to zero is possible, especially if there are defects on the haul road, such as potholes, corrugation, rutting, and loose material (Visser 2015).
- Speeds higher than 64 km/h: the maximum speed of the truck based on manufacturer specifications (Komatsu 2006).

The proposed back-calculation method is bounded to the use of speed values to derive rolling resistance from Rimpull curves. Therefore, unexpected information (outliers) should be removed because they could bias the analysis and lead to wrong rolling resistance estimation for a given segment.

Since the number of records in each segment is considerably high, Seo (2006) states that it is reasonable to use the Tukey method to identify and exclude outliers in the dataset. This method uses the interquartile range (IQR) to define lower and upper limits for



**Figure 4.** Initial set of haul roads and longitudinal profiles from the mining operational area to the crusher. Images are available in colour online.

capping, as presented in Equations (2)–(4):

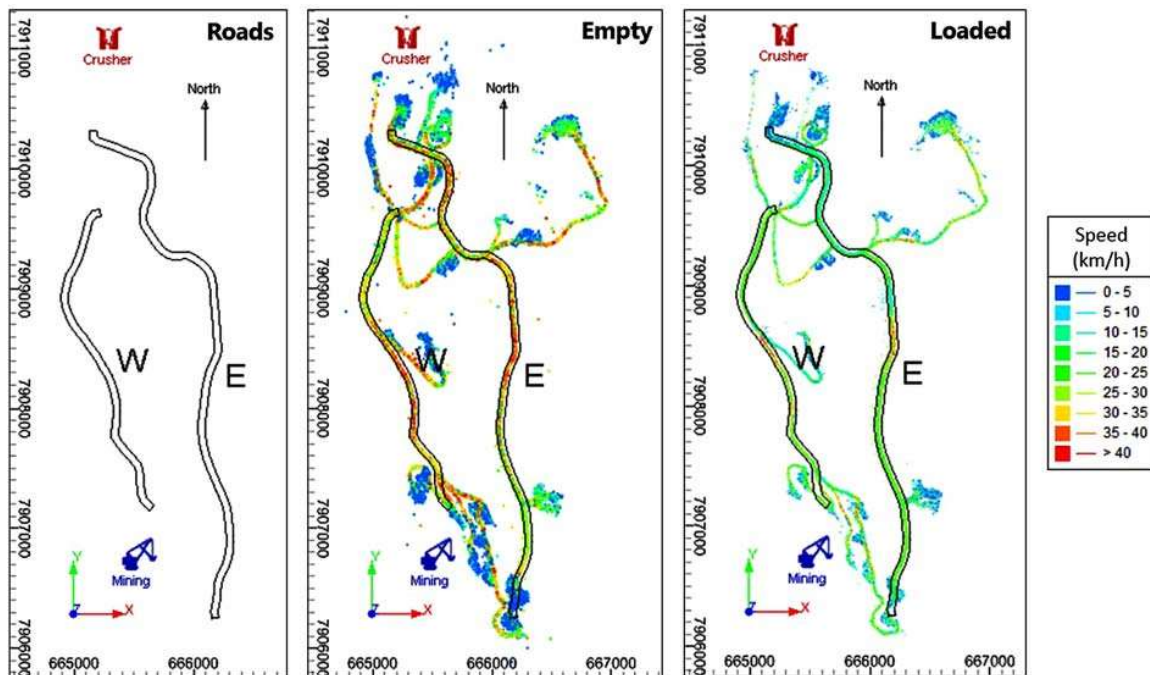
$$IQR = Q1 - Q3 \quad (2)$$

$$Lower\ Limit = Q1 - 1.5\ IQR \quad (3)$$

$$Upper\ Limit = Q3 + 1.5\ IQR \quad (4)$$

where Q1 is the 25th quartile, Q3 is the 75th quartile, and IQR is the interquartile range.

The outcome of this treatment is representative and expected speed records to be used in the assessments. The samples were treated for each segment and condition (empty or loaded).



**Figure 5.** Initial non-treated speed records from dispatch system, divided by payload (empty or loaded). Images are available in colour online.

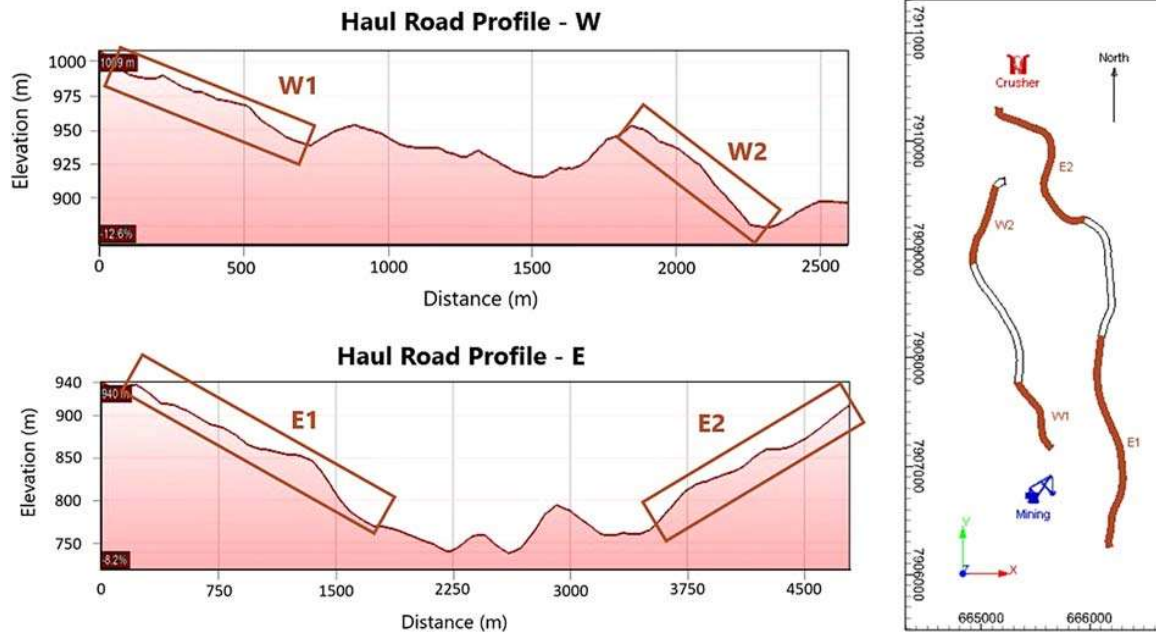


Figure 6. Haul road segment selection based on constant grades. Images are available in colour online.

**Rolling resistance assessment**

**Speed-Rimpull-gradeability curve back-calculation**

The truck speed-Rimpull-gradeability curves (propulsion and retarding) are presented in vehicle manufacturers' manuals to estimate truck speed based on its mass, engine Rimpull, and total resistance. Figure 10 shows the charts for propulsion and retarding of the

electric-drive truck 830E-AC taken from Komatsu (2006).

Once the average speeds of each payload and segment were calculated through a representative sample from the dispatching dataset, the following procedure for each payload condition (loaded or empty) was used to back calculate the rolling resistance for the segments.

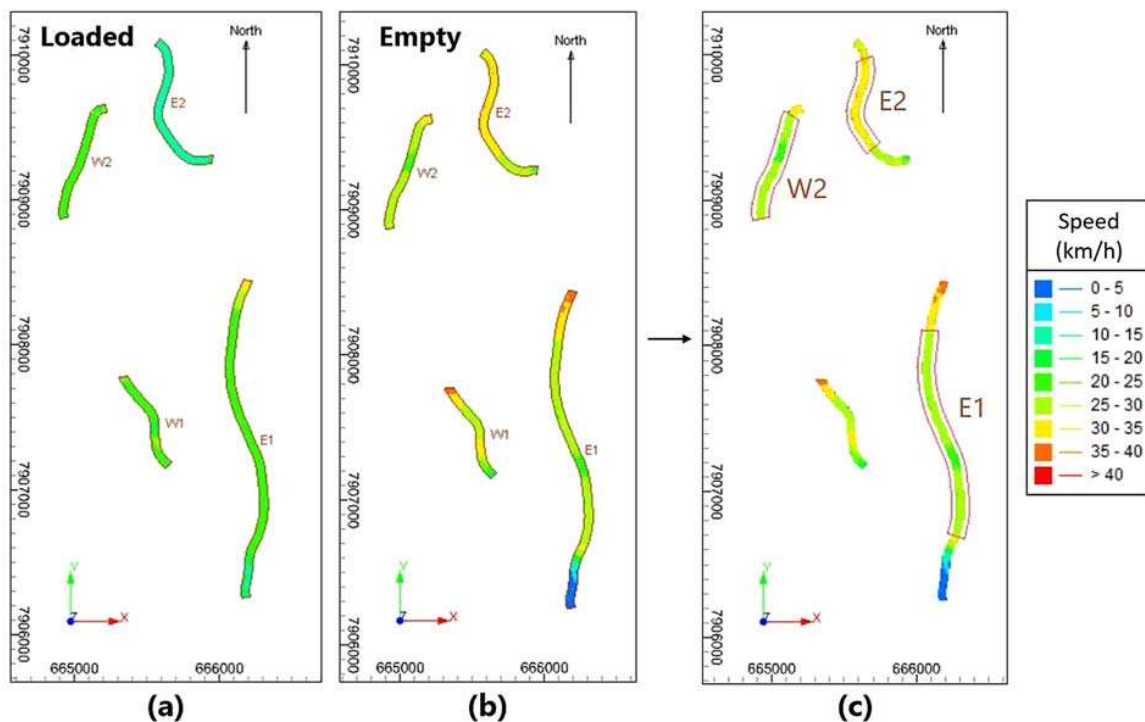
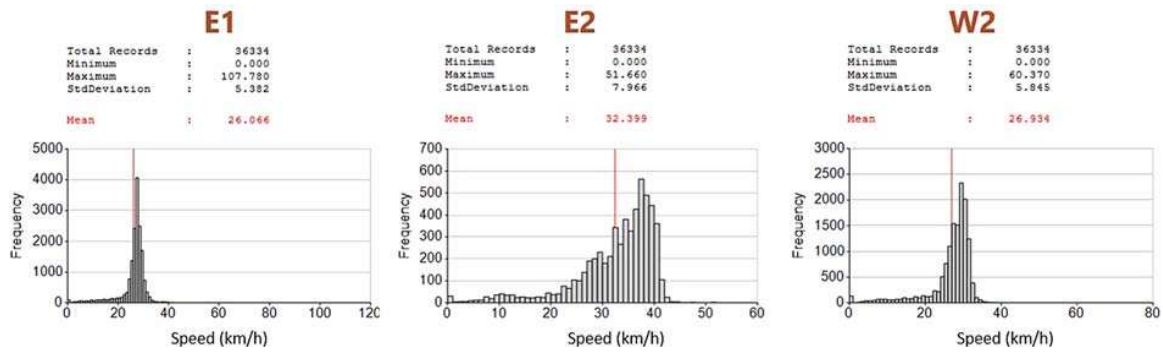
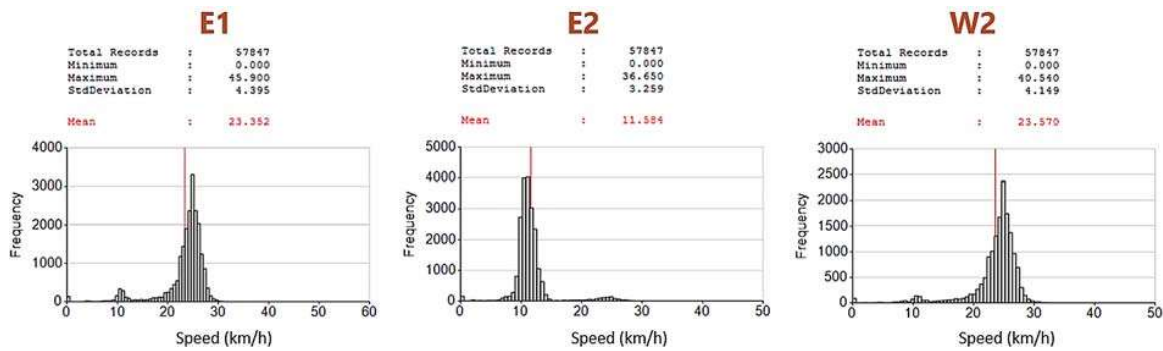


Figure 7. Interpolation of speed information by payload (loaded (a) or empty (b)) and selection of haul road sub-segments (c). Images are available in colour online.

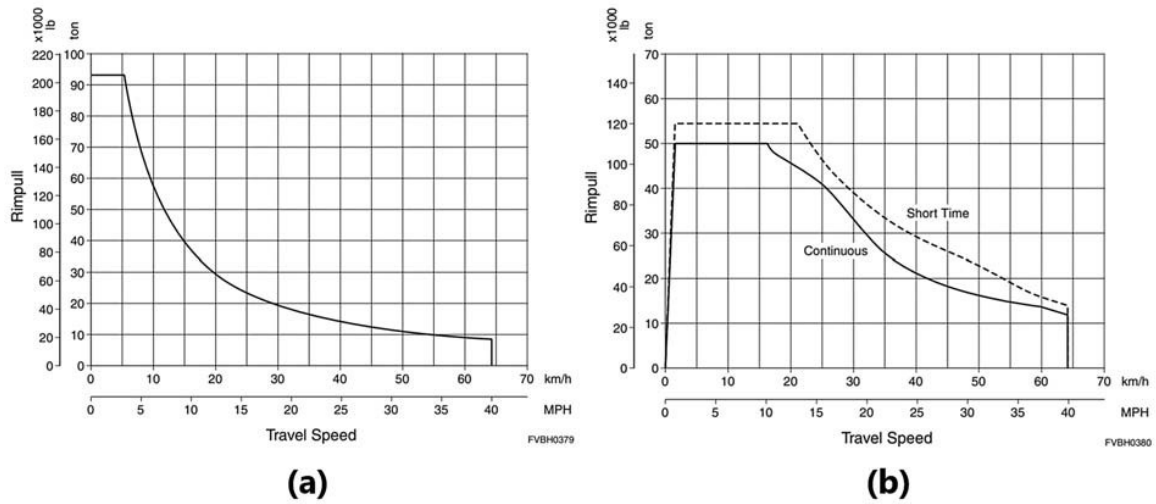




**Figure 8.** Histograms of initial dispatch data by segments – empty trucks. Images are available in colour online.



**Figure 9.** Histograms of initial dispatch dataset by segments – loaded trucks. Images are available in colour online.

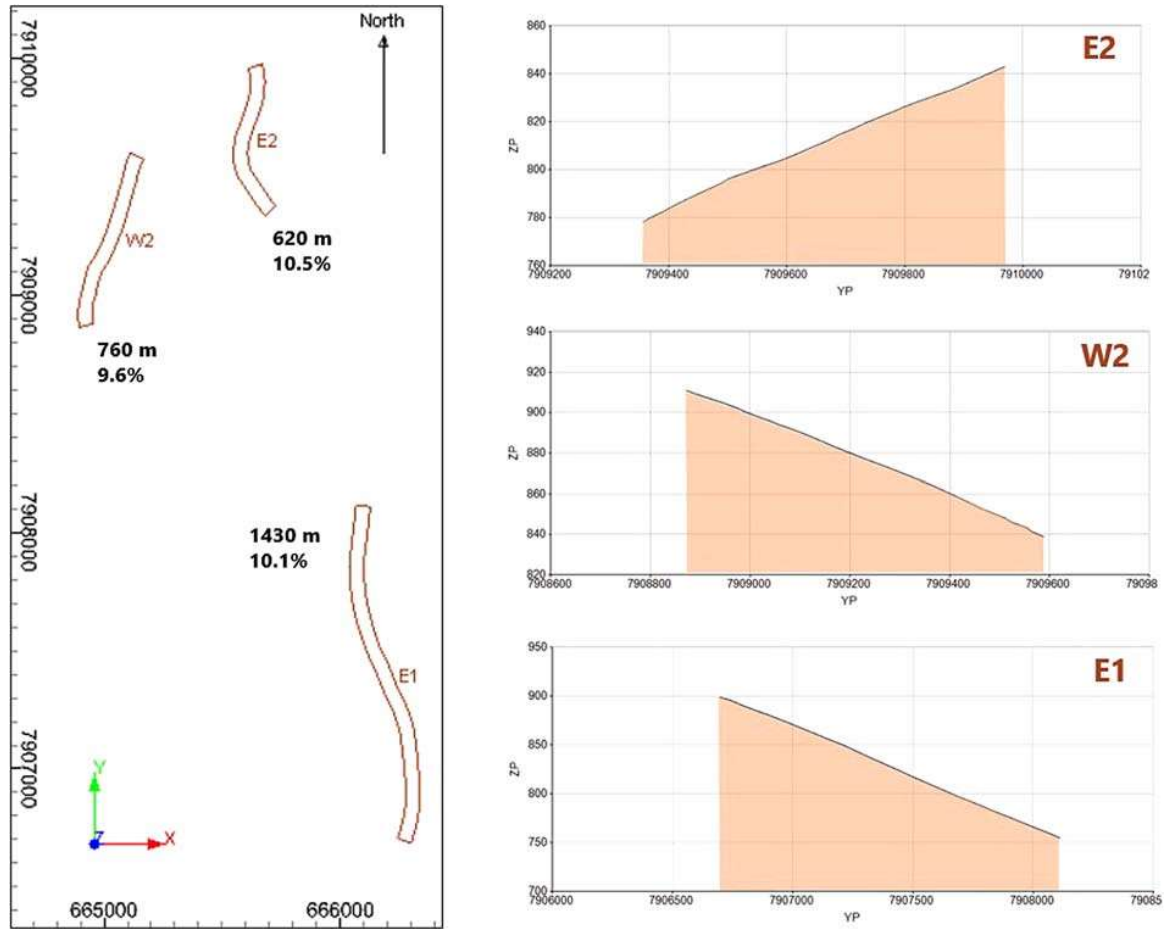


**Figure 10.** Speed–Rimpull–gradeability charts of (a) propulsion and (b) retarding for the electric truck 830E-AC. Images are available in colour online.

1. Choose the chart (propulsion curve used for uphill conditions; continuous retarding curve used for downhill conditions).
2. Project vertically from the speed value (km/h) until it intersects the curve.
3. Project horizontally to read the associated Rimpull (ton).
4. Calculate total resistance (%).

5. Subtract the actual grade of the segment being analysed.

For instance, the average speed of empty trucks in segment W2 (an uphill condition) was calculated as 28.6 km/h. According to the propulsion chart, Rimpull was found to be 21 tons. Using the payload of the loaded truck (164.2 tons), a total resistance of



**Figure 11.** Final selection of segments to be used in the back-calculation analysis of rolling resistance. Images are available in colour online.

12.8% was then calculated. Subtracting the actual haul road longitudinal grade of 9.6%, the rolling resistance of segment W2 was estimated to be 3.2%.

### Cooper's equations

An alternative way to determine the projected speed of trucks without using the Rimpull curves was developed by Cooper (2008). The author suggests the use of Equations (5) and (6) to calculate the expected velocity depending on the condition of the haul road (uphill or downhill) and the size and engine power of the truck:

$$v_{uphill} = \frac{0.367 \epsilon_t P_{Gross} \sqrt{(1 + GR^2)}}{GVM TR} \quad (5)$$

$$v_{downhill} = \frac{-0.367 \epsilon_r P_{Gross} \sqrt{(1 + GR^2)}}{GVM TR} \quad (6)$$

where  $P_{Gross}$  is the gross engine power (kW),  $\epsilon_t$  is the transmission efficiency,  $\epsilon_r$  is the retarder efficiency, GVM is the gross vehicle mass (t), GR is the grade of the haul road (negative for downgrade and positive for upgrade) (%), and TR is the total resistance (%).

In the same sense, having the speed values from a dataset, a rearrangement of Cooper's equations is

proposed to calculate rolling resistance, which gives Equations (7) and (8):

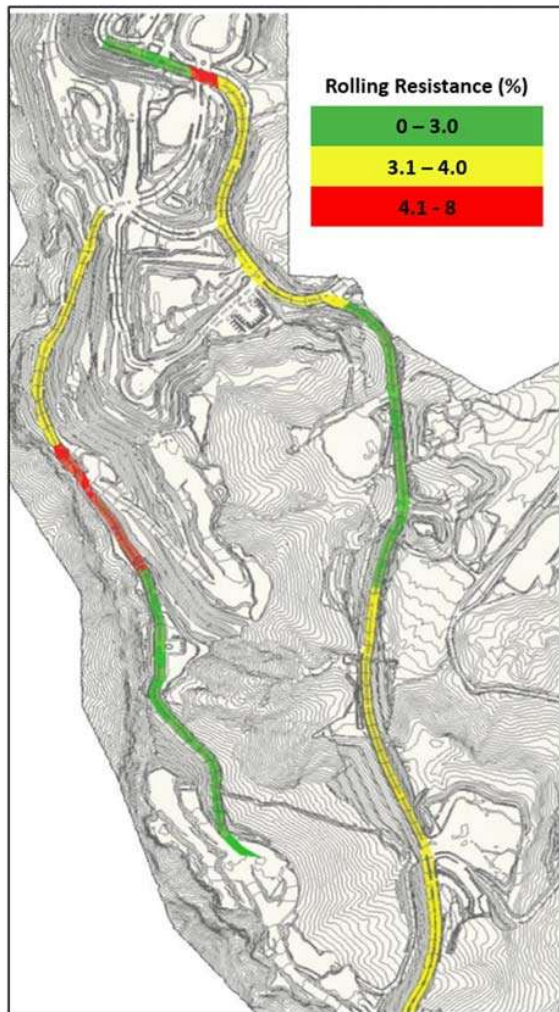
$$RR_{uphill} = \frac{0.367 \epsilon_t P_{Gross} \sqrt{(1 + GR^2)}}{GVM v_{uphill}} - GR \quad (7)$$

$$RR_{downhill} = \frac{-0.367 \epsilon_r P_{Gross} \sqrt{(1 + GR^2)}}{GVM v_{downhill}} - GR \quad (8)$$

For the present study, GVM is selected based on the payload status (empty or loaded), gross engine power is available on the truck's specifications, and grade is a characteristic of each segment. According to Cooper (2008), a transmission efficiency of 80% and a retarder efficiency of 115% work well for most of the scenarios. However, appropriate efficiencies were modelled to better fit the equations to the specific operational conditions.

### Results and discussions

A final set of three segments was selected for the analysis, all with continual grade profiles and speed records. Figure 11 shows the final segments selected, their lengths, grades, and longitudinal profiles.



**Figure 12.** Rolling resistance of the haul roads estimated using visual inspection (Silva 2020). Images are available in colour online.

According to Thompson et al. (2019), the selection of a haul road MMS for a mine, from the less complex to the most robust, is ‘user-, site- and material-specific’. Since different materials might be used for

the functional and structural design proposed by Thompson and Visser (1997), specific maintenance routine approaches are usually planned from road to road on a local basis. Thus, the subdivision of the network of mine haul roads into segments seems to also be appropriate in terms of the MMS.

These results were also compared to visual inspections undertaken in a previous study conducted by Silva (2020) on the same set of roads, as can be seen in Figure 12. For the sections used to perform the back-calculations, the rolling resistance values match with those ranked by the visual evaluation, which contributes to the reliability of the results derived using the proposed approach.

Table 1 presents a summary of the treatment made on the original dispatch dataset, going through the capping process to make the samples more representative in terms of truck speed information.

The necessity of treatment for large amounts of data from dispatch systems is discussed by Thompson et al. (2019). They state that, even though fleet information can help in identifying road defects and optimizing productivity, the number of records can be excessive. This could create biased outcomes and wrong assumptions based on the raw data, which leads to unnecessary maintenance actions and a possible increase in costs, the opposite aim of the MMS.

Table 2 shows the values used and the results of the back-calculation of rolling resistance performed for each payload condition and segment using the speed–Rimpull–gradeability curves.

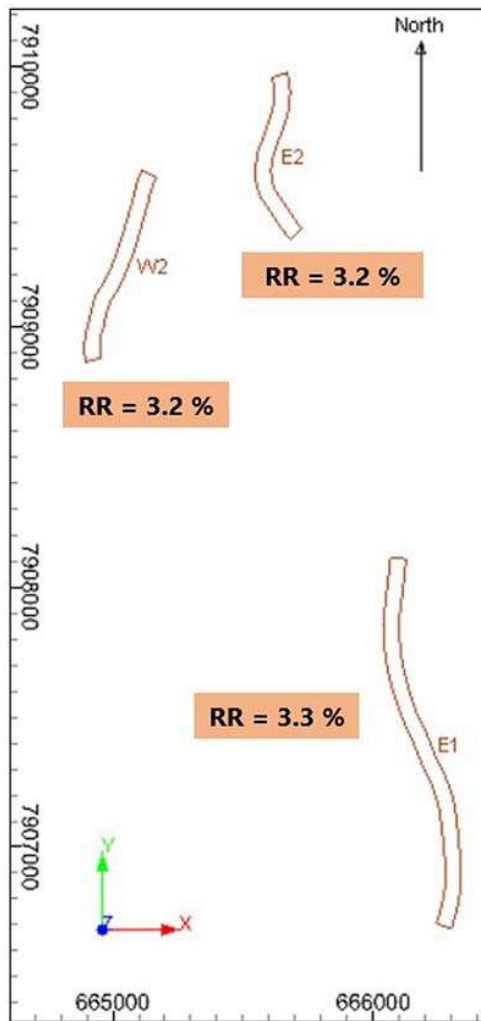
The results show that there are some differences between the values of rolling resistance estimated by different curves (propulsion and retarding) using the back-calculation approach, where uphill segments seem to present more realistic values. Thompson et al. (2019) also state that there is an overestimation using unladen charts, which could be explained by excessive variations in the trucks’ acceleration when going downhill – especially related to excess speed

**Table 1.** Capping applied to original dispatch system dataset and final speeds calculated by payload and segment.

Payload	Segment	Q1	Q3	IQR	Upper Limit	Lower Limit	Average Speed (km/h)
Empty	E1	25.9	28.5	2.6	32.4	22.0	27.3
	E2	29.2	38.1	8.9	51.4	15.9	34.4
	W2	26.3	30.4	4.1	36.5	20.2	28.6
Loaded	E1	22.9	25.7	2.8	30.0	18.7	24.6
	E2	10.4	12.0	1.7	14.5	7.9	11.1
	W2	22.9	25.7	2.8	30.0	18.7	24.6

**Table 2.** Rolling resistances estimated using speed–Rimpull–gradeability curves for each payload and segment.

Payload	Segment	Length (m)	Grade (%)	GVM (kg)	Average Speed (km/h)	Total Resistance (%)	Rolling Resistance (%)
Empty	E1	1430	10.1	164,200	27.3	11.3	3.3
	E2	620	−10.5	164,200	34.4	−10.4	6.6
	W2	760	9.6	164,200	28.6	11.0	3.2
Loaded	E1	1430	−10.1	385,800	24.6	−8.6	0.8
	E2	620	10.5	385,800	11.1	10.6	3.2
	W2	760	−9.6	385,800	24.6	−8.3	1.3



**Figure 13.** Results of rolling resistance estimated for each segment. Images are available in colour online.

penalties and safety standards. This leads to the decision to only consider the laden conditions for the initial estimation of rolling resistance based on the back-calculation, as can be seen in Figure 13.

The results bring initial information regarding the quality of the segments, where they all presented high rolling resistances compared to internationally benchmarked values of 2–2.5% for usual mine operations (Tannant and Regensburg 2001). From a maintenance perspective, the segments seem to present an opportunity for improvement in terms of road conditions for truck trafficability. Considering that these segments are free-ride routes, i.e. no speed limits

imposed, the trucks could be able to develop higher velocities and reduced cycle times, which is extremely positive from a cost-effective point of view.

However, rolling resistance is supposed to slightly vary in each segment, and these variations are important to better assess the corrective maintenance routine in the mine. Therefore, in order to use each record of the dispatch data to analyse the rolling resistance of its surroundings, the authors suggest the creation of a model using Cooper’s equations – with some adjustments using the results of the back-calculation method.

Table 3 shows the results of rolling resistance estimated for each section using Cooper’s equations.

The rolling resistance calculated with Cooper’s equations shows differences when comparing uphill and downhill situations, presenting no similarity to the rolling resistance previously calculated using Rimpull curves, including the presence of negative values. In fact, some differences are observed when comparing the curves of Cooper’s equations to the Rimpull curves provided by the manufacturers, as discussed by Thompson et al. (2019). When it comes to the Cooper’s equations, it is possible to adjust them using the only variable parameter – the transmission and retarder efficiencies ( $\epsilon$ ).

As can be seen in Table 3, the efficiencies used were those suggested by Cooper (2008). To fit the equations to the 830E-AC Rimpull charts, the efficiencies were adjusted using the results of rolling resistance previously derived with the back-calculation approach. Table 4 shows the efficiencies adjusted for each payload and segment.

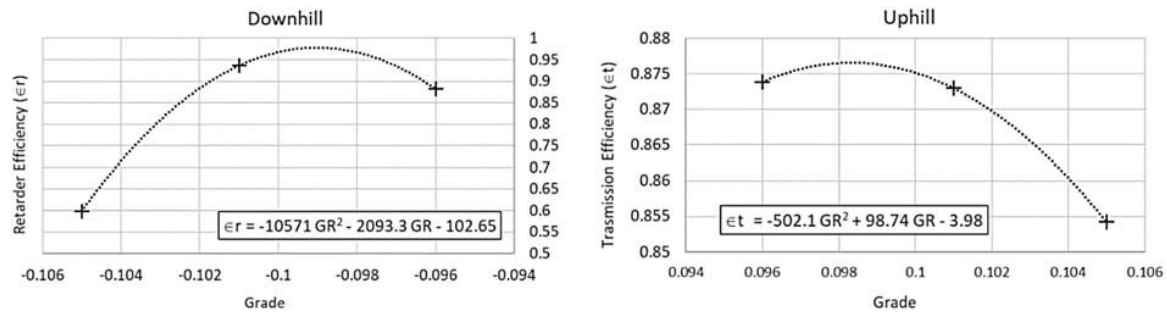
To apply the Cooper’s equations on a dispatch dataset to estimate the rolling resistance on a broader approach, a relationship between the adjusted efficiencies and the grades is proposed using polynomial regression curves for each grade condition, as can be seen in Figure 14.

**Table 4.** Cooper’s equation efficiencies adjusted for each payload and segment.

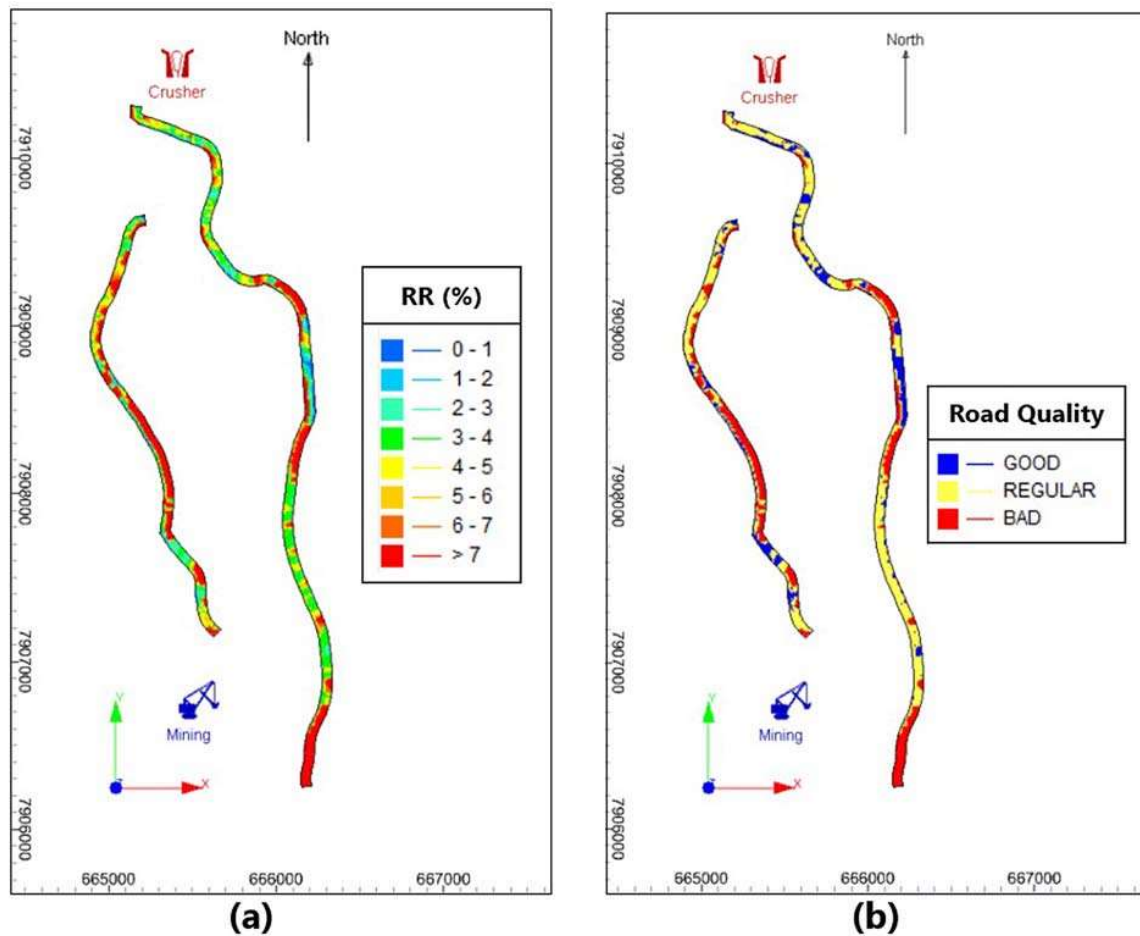
Payload	Segment	Grade (%)	Rolling Resistance (%)	$\epsilon_{adj}$
Empty	E1	10.1	3.3	0.87
	E2	–10.5	3.2	0.60
	W2	9.6	3.2	0.87
Loaded	E1	–10.1	3.3	0.94
	E2	10.5	3.2	0.85
	W2	–9.6	3.2	0.88

**Table 3.** Rolling resistances estimated using Cooper’s equations for each payload and segment.

Payload	Segment	Length (m)	Grade (%)	GVM (kg)	Pgross (kW)	$\epsilon$	Average Speed (km/h)	Total Resistance (%)	Rolling Resistance (%)
Empty	E1	1430	10.1	164,200	1865	0.8	27.3	12.3	2.2
	E2	620	–10.5	164,200	1865	1.15	34.4	–14.0	–3.5
	W2	760.0	9.6	164,200	1865	0.8	28.6	11.7	2.1
Loaded	E1	1430	–10.1	385,800	1865	1.15	24.6	–8.4	1.7
	E2	620	10.5	385,800	1865	0.8	11.1	12.8	2.3
	W2	760	–9.6	385,800	1865	1.15	24.6	–8.3	1.3



**Figure 14.** Relationship between adjusted efficiencies and grades of the road segments for uphill or downhill conditions. Images are available in colour online.



**Figure 15.** Interpolation of rolling resistance records in the initial set of roads and legends applied (a) considering rolling resistance ranges and (b) considering road quality based on rolling resistance values. Images are available in colour online.

The results show that retarder and transmission efficiencies could be estimated using the grade of the haul roads, where the specific speed record lies through regression curves. The Cooper's equations and the regression curves were combined to create a final model to specifications of the mine and the 830E-AC truck.

The model was applied to each speed record of the dispatch system inside the initial set of haul roads, using grade information from querying the triangles of the wireframe surfaces. The values were

interpolated using a  $10 \times 10$  m grid spacing with an inverse-distance weighted average estimation and a search radius of 30 m in X and Y (Figure 15).

It is noted that some parts of the segments present different rolling resistance values when compared to those estimated in the back-calculation approach for the entire segment, especially in segment E2. Regarding maintenance routines in mining operations, the interpolation can be used on a daily basis to prioritize road maintenance tasks for the next shift or day, for instance. In the example shown in Figure 15, a

'good' condition refers to rolling resistances below 3%, 'regular' between 3% and 4%, and 'bad' above 4%.

Some considerations are appropriate when using this approach, since it relies essentially on truck speed information. For instance, in curves and road intersections, deceleration or even a total stop of the truck is usually observed, and it can affect the rolling resistance estimation and misrepresent the real condition of the haul road.

Some actions can be taken to better treat the data and improve this assessment:

- Rely on staff and operators' expertise in the operation to better analyse the data.
- Exclude unrealistic values before the analysis.
- Apply upper and lower limits on the dispatch data to exclude outlier values.
- Avoid small curvature radius and intersections, where velocities are affected by turning radius and sight and stopping distances.
- Further model the factors, using extra points to find a better fit to the grade x efficiency curves.

## Conclusion

This study concluded that rolling resistance can be estimated using dispatch system data within haul road segments. The back-calculation approach using speed–Rimpull–gradeability curves seems to provide a reasonable estimate for rolling resistance under any condition (uphill, flat, or downhill road profile). On the other hand, the estimation using the adjusted Cooper's equations considering the dispatch speed records was able to predict the rolling resistance for a variety of points, providing a local appraisal of rolling resistance within segments where the Rimpull back-calculation could not offer the required resolution. The interpolation of these values can be used to create rolling resistance maps and better assess road conditions locally.

Considering that many mining companies are continuously reviewing their haul road MMSs, the study provides important insights into the industry in terms of tactical approaches to assess rolling resistance in mining operations. The use of these methodologies can assist in identifying issues on mine haul road segments and assessing road quality, which will help to improve truck performance and maintenance asset allocation and reduce haulage costs.

The approach can be extended to other mining operations, where specific models can be created with haul road profiles and truck fleet specifications. However, considering the particularity of each mine and the staff involved, special attention must be paid when adjusting the model for the rolling resistance analysis. Incorrect application of the approaches

could lead to inaccurate interpretation of the quality of the roads, resulting in an inappropriate road maintenance plan.

Further research is planned to improve the methodology, especially related to the selection of efficiency factors to be used in the models for other operations. It is also planned to implement the methodology using a JavaScript routine to automate the analysis. The main advantage of creating a script is the ability to systematize the procedure, to reproduce the results, and to make it available for mining companies to use.

## Acknowledgements

The authors thank the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for providing a master's degree scholarship during this research. We are also grateful to Anglo American for providing the data to this study. Special thanks to our colleagues and professors from the Mineral Research and Mine Planning Laboratory (LPM – UFRGS) who provided insight and expertise that greatly assisted this work.

## Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

## Data availability statement

The data that support the findings of this study are available from a mining company. Restrictions apply to the availability of these data, which were used under license for this study. Data are available from the authors with the permission of the company.

## ORCID

Douglas Alegre  <http://orcid.org/0000-0001-6257-872X>  
Rodrigo de Lemos Peroni  <http://orcid.org/0000-0003-0131-5832>

## References

- Cooper A. 2008. Modelling truck performance in a spreadsheet [internal documents]. Perth (WA): Snowden Mining Consultants.
- Hugo D, Heyns PS, Thompson RJ, Visser ST. 2008. Haul road defect identification using measured truck response. *J Terramechanics*. 45(3):79–88.
- Joseph TG, Curley M, Anand A. 2017. Operational methodologies for rolling resistance evaluation. *Geotech Geol Eng*. 35(6):2935–2946.
- Kaufman WW, Ault JC. 1977. Design of surface mine haulage roads – a manual: information circular 8758. Pittsburgh (PA): US Department of Interior, Bureau of Mines.
- Komatsu. 2006. Specifications and application handbook. [place unknown]: [publisher unknown].
- Proof Engineers: Road Condition Monitoring. 2017. [accessed 2020 October]. <http://www.proofengineers.com.au/systems/road-condition-monitoring>.

- Seo S. 2006. A review and comparison of methods for detecting outliers in univariate data sets [master's thesis]. Pittsburgh (PA): University of Pittsburgh.
- Silva A. 2020. Análise de Qualidade de Estradas de Mineração Utilizando Indicadores Operacionais [Qualitative Assessment of Haul Roads using Operations Indicators] [master's thesis]. Porto Alegre (RS): Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Soofastaei A. 2017. Intelligence predictive analysis to reduce production cost. *Australian Resources and Investment*. 11(1):24–25.
- Tannant D, Regensburg B. 2001. Guidelines for mine haul road design. [place unknown]: [publisher unknown].
- Thompson RJ. 2011. Mine haul road design, construction and maintenance management. [place unknown]: [publisher unknown].
- Thompson RJ. 2017. Can big data answer the big question – how do my haul roads perform? Proceedings of the Haulage and Loading Conference; May 7–10; Phoenix (AZ): Mining Media International.
- Thompson RJ, Peroni RL, Visser AT. 2019. Mining haul roads: theory and practice. Leiden (XC): CRC Press/Balkema.
- Thompson RJ, Visser AT. 1997. An introduction to the integrated design of surface mine haul roads. *Int J Surf Mining, Reclamation Environ*. 11(3):115–120.
- Thompson RJ, Visser AT. 2000. The functional design of surface mine haul roads. *J South Afr Inst Min Metall*. 100(3):169–180.
- Thompson RJ, Visser AT. 2003. Mine haul road maintenance management systems. *J South Afr Inst Min Metall*. 103(5):303–312.
- Van Staden R, Thompson RJ, Visser AT. 2006. Mine road maintenance management using measured truck response. Proceedings of the Haulage and Loading Conference; May 21–23; Phoenix (AZ): Mining Media International.
- Visser AT. 2015. Haul roads can make money. *J South Afr Inst Min Metall*. 115(11):993–999.

## **CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A meta desta dissertação foi desenvolver avaliações e metodologias a serem aplicadas no âmbito das estradas de mina não pavimentadas, com foco no projeto geométrico, resistência ao rolamento, monitoramento e manutenção das vias, tanto em fase de projeto como em fase de operação.

Os dois artigos que compõem esta dissertação demonstram que os objetivos previamente definidos foram cumpridos:

- i. Foi comparado o impacto na REM quando variados os parâmetros geométricos dos acessos em dois tipos de depósitos distintos - um verticalizado e outro mais horizontalizado;
- ii. Pela análise comparativa, foram identificados os melhores cenários geométricos dos acessos que incrementavam a quantidade de minério e reduziam o material estéril de ambos os tipos de depósito.
- iii. Foram criadas duas curvas de regressão que podem ser utilizadas para uma primeira aproximação do impacto da REM em depósitos que possuam geometrias equivalentes para diferentes alternativas de projetos de estradas
- iv. Foi estimada a resistência ao rolamento de trechos de estradas utilizando a informação de inclinação longitudinal das vias e dados de velocidade do sistema de despacho por retro análise das curvas de Rimpull dos caminhões de uma mina de ferro.
- v. Os valores estimados pela retro análise foram utilizados para ajustar os coeficientes das equações de resistência ao rolamento de Cooper
- vi. As equações de Cooper foram aplicadas em uma série de pontos coletados pelo sistema de despacho dentro do limite das estradas, o que produziu várias estimativas da resistência ao rolamento localizadas;



- vii. Os valores de resistência ao rolamento foram interpolados para a criação de mapas de resistência ao rolamento, qualidade das estradas e prioridade de manutenção.

## **4.1 Conclusões**

### **4.1.1 Artigo 1**

O estudo concluiu que mudanças em determinados parâmetros geométricos dos acessos podem afetar o ângulo de talude global da cava final e conseqüentemente as quantidades de estéril e minério – portanto a REM. Os resultados mostraram que um incremento de 2% na inclinação longitudinal dos acessos, em relação ao caso base, contribuiu para uma redução na REM de 1,08% para cavas mais horizontalizadas, e de até 4,15% em uma cava mais profunda e verticalizada. Já o aumento da largura da pista, diminuição da inclinação longitudinal e inclusão de *switchbacks* elevou os valores da REM para os dois tipos de geometria de depósito analisados, resultante da diminuição do ângulo global de talude e conseqüente adição de blocos de estéril para a cava final.

Essas variações são importantes no segmento da mineração, onde se tem como objetivo a geração de lucro através de um planejamento estratégico. Isso porque a diminuição na REM terá impacto positivo no fluxo de caixa anual do projeto, contribuindo para a maximização do VPL. Tendo em vista que muitas empresas do segmento da mineração estão em constante otimização do seu plano de lavra, o estudo se mostra de grande contribuição para a indústria no que diz respeito à valorização econômica de projetos mineiros, onde a variação geométrica de acessos pode ter conseqüências na viabilidade (ou inviabilidade) do projeto.

Os resultados obtidos para as duas geometrias de depósitos e os conseqüentes impactos podem ser ampliados para outros depósitos que possuam geometrias equivalentes através das curvas de regressão obtidas para uma primeira aproximação do impacto na REM para diferentes alternativas de projeto de estradas. No entanto,

considera-se que para um nível de detalhamento maior sejam feitos estudos semelhantes para determinar a escolha de equipamentos em fase iniciais de projeto ou em análises de substituição de frota.

#### **4.1.2 Artigo 2**

Este estudo demonstrou que a resistência ao rolamento pode ser estimada usando dados do sistema de despacho em segmentos de estradas de mina. A abordagem de retro análise usando curvas Rimpull fornece uma estimativa razoável para a resistência ao rolamento sob qualquer condição (perfil de estrada em aclave, plano ou declive). Por outro lado, a estimativa usando as equações de Cooper considerando os registros de velocidade de despacho foi capaz de prever a resistência ao rolamento para uma variedade de pontos, fornecendo uma avaliação local da resistência ao rolamento dentro de segmentos onde a retro análise não poderia oferecer a resolução necessária. A interpolação desses valores pode ser usada para criar mapas de resistência ao rolamento e avaliar de forma mais eficiente as condições da estrada localmente.

Considerando que muitas empresas de mineração estão continuamente revisando seus sistemas de gerenciamento de manutenção de estradas de transporte, o estudo fornece informações importantes sobre a indústria em termos de abordagens táticas para avaliar a resistência ao rolamento nas operações de mineração. O uso dessas metodologias pode auxiliar na identificação de problemas nos segmentos de estradas de transporte de minas e na avaliação da qualidade das estradas, o que ajudará a melhorar o desempenho do caminhão e a alocação de ativos de manutenção, além de reduzir os custos de transporte.

A abordagem pode ser estendida a outras operações de mineração, onde modelos específicos podem ser criados com perfis de estradas de transporte e especificações de frota de caminhões. Porém, considerando a particularidade de cada mina, atenção especial deve ser dada no ajuste do modelo para a análise de resistência ao rolamento. A aplicação incorreta das abordagens pode levar a uma interpretação

imprecisa da qualidade das estradas, resultando em um plano de manutenção de estradas inadequado.

## **4.2 Recomendações e Trabalhos Futuros**

O estudo do artigo 1 será continuado com a investigação dos cenários de projetos geométricos de estradas com foco nos ganhos financeiros resultantes da redução da REM. A ideia é encontrar parâmetros geométricos ótimos que contemple não só a redução da REM, mas que produza possíveis cenários que permitam redução no tempo de ciclo de caminhões e/ou custos operacionais de produção.

Sobre a metodologia para calcular a resistência ao rolamento desenvolvida no artigo 2, outros desenvolvimentos estão previstos para aprimorá-la, especialmente relacionadas à seleção de fatores de eficiência a serem utilizados nos modelos para outras operações. Além disso, a inclusão de mais informações para diminuir o ruído e qualidade dos dados poderão ser foco de trabalhos futuros, como o uso de imagens da mina, informações de dispositivos embarcados nos caminhões, dados de eventos de relacionados à segurança, etc.

Também está prevista a implementação da metodologia utilizando uma rotina Java Script para automatizar a análise. A principal vantagem da criação de um script é a capacidade de sistematizar o procedimento, reproduzir os resultados e disponibilizá-lo para uso das mineradoras. A Figura 26 apresenta um esboço inicial já iniciado da interface gráfica do Script, com seções das etapas do procedimento.

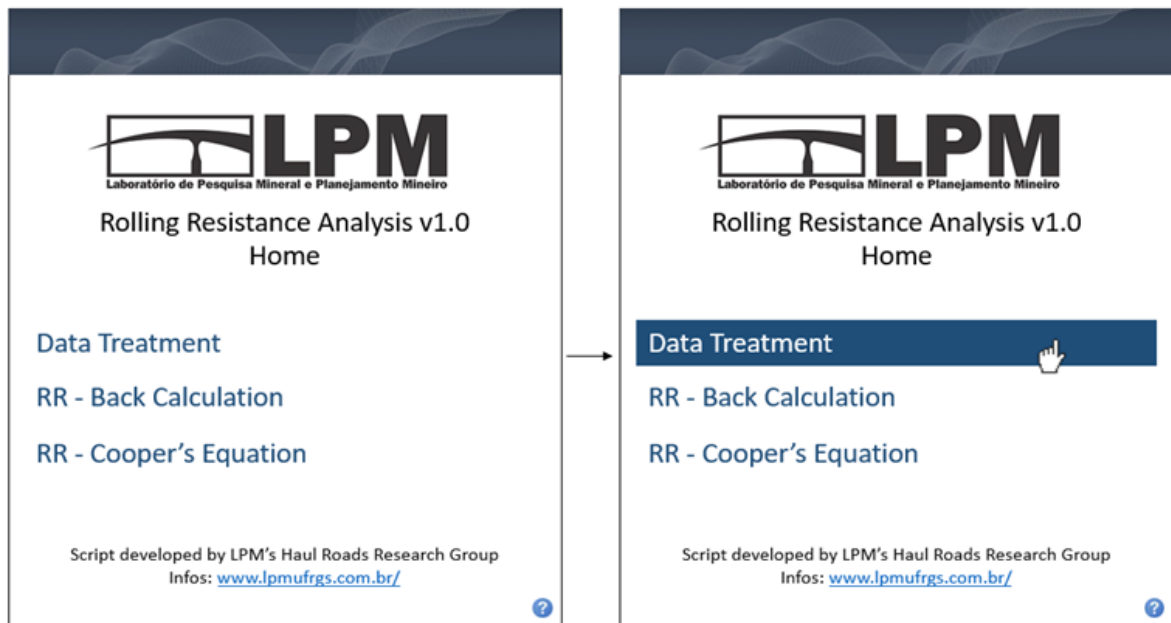


Figura 26 - Interface inicial do Script para estimativa da resistência ao rolamento utilizando metodologia desenvolvida pelo artigo 2.

A primeira seção da rotina é o “*Data Treatment*”, que visa selecionar uma amostra representativa dos dados de despacho dentro da estrada de transporte fornecida. As próximas 2 seções visam realizar a estimativa da Resistência ao Rolamento com base nos 2 métodos descritos na metodologia.

Na seção “*RR – Back Calculation*”, a resistência ao rolamento é calculada para cada seção com base nas curvas de Rimpull fornecidos pelas fabricantes dos caminhões. Na seção “*RR - Cooper's Equations*”, o script calcular a resistência ao rolamento para cada registro de velocidade e interpola os resultados os mapas da resistência ao rolamento ao longo das estradas. A Figura 27 mostra a interface de cada seção, suas entradas e saídas.

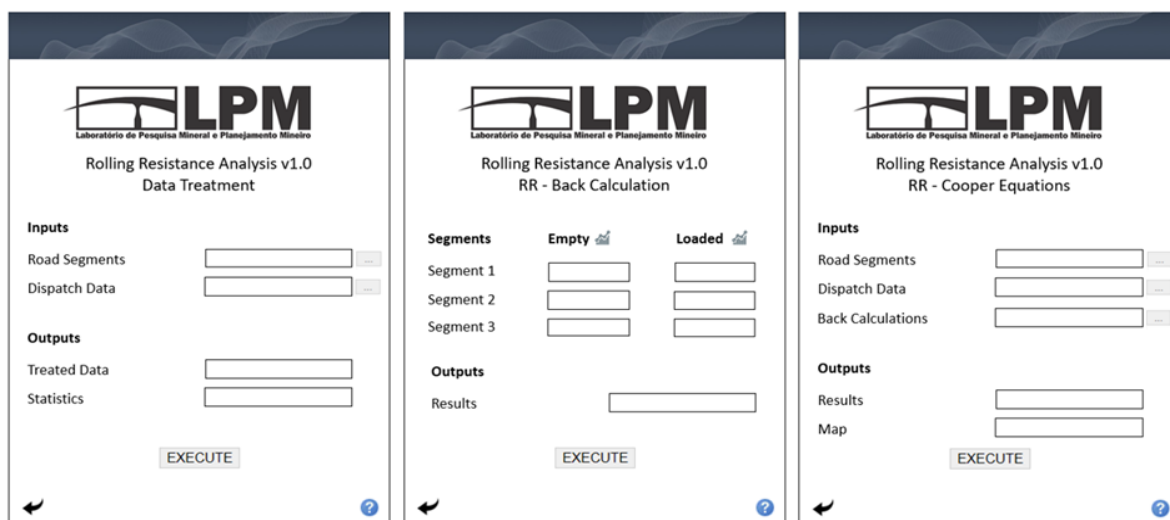


Figura 27 - Interface de cada seção do Script para estimativa da resistência ao rolamento utilizando metodologia desenvolvida pelo artigo 2.

O script permite também a inserção de metodologias e rotinas desenvolvidas por outros trabalhos dentro do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM – UFRGS), como o trabalho de adequação geométrica de estradas realizado por Pellissari (2019), além de trabalhos futuros do grupo de pesquisa de estradas de mineração liderados pelo Prof. Dr. Rodrigo Peroni.

## REFERÊNCIAS

ALEGRE, Douglas; PERONI, Rodrigo; AQUINO, Eduardo. The impact of haul road geometric parameters on open pit mine strip ratio. **REM-International Engineering Journal**, v. 72, n. 1, p. 25-31, 2019.

ALEGRE, Douglas; PERONI, Rodrigo; AQUINO, Eduardo; DILLE, Felipe. A method to assess haul roads rolling resistance using dispatch system data. **Mining Technology**, p. 1-12, 2021.

BRASIL. **NR 22: Segurança e saúde ocupacional na mineração**. Brasília: Ministério do trabalho e emprego, 1978. Disponível em: <<http://www.segurancaotrabalho.eng.br>>. Acesso em: 5 mar. 2021.

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

COOPER, A. **Modelling truck performance in a spreadsheet**. Principal Mining Consultant, Snowden Mining Consultants. Internal Documents, Perth, WA, Australia. 2008.

DELAIR. **Automatic haul road geometry measurement**. Disponível em: <<https://delair.aero/mines-aggregates-business-solutions/haul-roads-analytics-for-mines-and-aggregates/>>. Acesso em: 10 jun. 2021.

FRITH, R.; COLWELL, M. Introduction to ground mechanics. In: Darling, P. (Ed). **SME Mining Engineering Handbook**. SME. p. 463-470, 2011.

HUGO, D.; THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. Haul road defect identification using measured truck response. **Journal of Terramechanics**, v. 45, n. 3, p. 79-88, 2008.

HUSTRULID, W. A.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. **Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack**. CRC Press, 2013.

JOSEPH, T. G.; CURLEY, M.; ANAND, A. Operational methodologies for rolling resistance evaluation. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 35, n. 6, p. 2935-2946, 2017.

KAUFMAN, W. W.; AULT, J. C. **Design of surface mine haulage roads: a manual**. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1977.

KOMATSU. **Komatsu Intelligent Machine Control: The Future Today**. Disponível em: <<https://www.komatsu.eu/en/komatsu-intelligent-machine-control>>. Acesso em: 03 jun. 2021.

LERCHS, H; GROSSMANN, I. F. Optimum design of open-pit mines. In: Joint CORS and ORSA Conference. **Transactions CIM**, v. 68, p. 17-24, 1965.

MARAIS, Willem J.; THOMPSON, Roger J.; VISSER, Alex T. Using mine truck on-board data as a decision making tool for mine road maintenance management. In: **Proceedings of the 7th International Conference on Managing Pavement Assets**. 2008. p. 6-18.

PELLISSARI, Fabricio Pereira. **Projeto de estradas para mineração: caracterização e análise de aplicações práticas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

PERONI, R. **Projeto de Estradas de Mineração**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018. Notas de Aula.

PROOF ENGINEERS. **Road Condition Monitoring**. Disponível em: <[www.proofengineers.com.au/systems/road-condition-monitoring](http://www.proofengineers.com.au/systems/road-condition-monitoring)>. Acesso em: 10 jun. 2021.

SOKOLIC, F.; RAWLINS, M.; DUFFY, K. A cost effective method for determining the position of mine haul road defects from the road edge. **International Journal of Interactive Mobile Technologies**, v.4, n. 1, p. 38-41, 2010.

SOOFASTAEI, A. Intelligence Predictive Analysis to Reduce Production Cost. **Australian Resources and Investment**, v. 11, n. 1, p. 24-5, 2017.

SOOFASTAEI, A. *et al.* A discrete-event model to simulate the effect of truck bunching due to payload variance on cycle time, hauled mine materials and fuel consumption. **International journal of mining science and technology**, v. 26, n. 5, p. 745-752, 2016.

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

SULLIVAN, T. D. Pit slope design and risk – A view of the current state of the art. In: **Proceeding of the Int. Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering Situations**. 2006.

TANNANT, D.; REGENSBURG, B. **Guidelines for mine haul road design**. School of Mining and Petroleum Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, 2001.

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

THOMPSON, R. J. Design, construction, and maintenance of haul roads. In: Darling, P. (Ed). **SME Mining Engineering Handbook**. SME. p. 957-977. 2011.



THOMPSON, R. J. Mine haul road design and management best practices for safe and cost-efficient truck haulage. In: **Society for Mining, Metallurgy and Exploration 2010 Conference Proceedings Pre-print**. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2010. p. 1-10.

THOMPSON, R.J. Can big data answer the big question – how do my haul roads perform? In: **Mining Media International Haulage and Loading Conference**, 7–10 May, Phoenix, AZ, USA. 2017.

THOMPSON, R.J. **Haul Road Design Considerations**. Engineering & Mining Journal. South Africa. p. 36-43, jun. 2009.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. An introduction to the integrated design of surface mine haul roads. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 11, n. 3, p. 115-120, 1997.

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

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. Selection and maintenance of mine haul road wearing course materials. **Mining Technology**, v. 115, n. 4, p. 140-153, 2006.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. The functional design of surface mine haul roads. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 100, n. 3, p. 169-180, 2000.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. An integrated haul road design system to reduce cost per tonne hauled. In: **World Mining Equipment Haulage 2002 Conference**. 2002. p. 1-14.

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

TOLWINSKI, B.; UNDERWOOD, R. A scheduling algorithm for open pit mines. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 7, n. 3, p. 247-270, 1996.

VALE. **Manual de Estradas de Mina da Vale S.A.** Belo Horizonte, 2011.

VAN STADEN, R.; THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. Mine road maintenance management using measured truck response. **Engineering & Mining Journal**, 2006.

VISSER, A. T. Haul roads can make money!. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 115, n. 11, p. 993-999, 2015.