



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE JURUTI  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**RENATA JOICE DOLZANE DUARTE**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INFRAESTRUTURA DE MINA NA EFICIÊNCIA  
DAS OPERAÇÕES DE LAVRA EM MINAS A CÉU ABERTO**

**JURUTI-PA  
2023**

**RENATA JOICE DOLZANE DUARTE**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INFRAESTRUTURA DE MINA NA EFICIÊNCIA  
DAS OPERAÇÕES DE LAVRA EM MINAS A CÉU ABERTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas; Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti.

Orientador: Msc. Matheus Diniz Pinto de Moraes.

**JURUTI-PA  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas (SIBI) da UFOPA  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFOPA - Biblioteca Campus Juruti**

---

Duarte, Renata Joice Dolzane.

Análise da influência da infraestrutura de mina na eficiência das operações de lavra em minas a céu aberto / Renata Joice Dolzane Duarte - Juruti, 2023.

48f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Oeste do Pará-UFOPA. Campus Universitário de Juruti. Bacharelado em Engenharia de Minas.

Orientador: Matheus Diniz Pinto de Moraes.

1. Infraestrutura de mina. 2. Projeto geométrico. 3. Projeto estrutural. I. Moraes, Matheus Diniz Pinto de. II. Título.

UFOPA Campus Juruti

CDD 630.7 23.ed.


**RENATA JOICE DOLZANE DUARTE**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INFRAESTRUTURA DE MINA NA EFICIÊNCIA  
DAS OPERAÇÕES DE LAVRA EM MINAS A CÉU ABERTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas; Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti.


Conceito: 9,3

Data de Aprovação: 20/11/2023

Documento assinado digitalmente  
 **ALAN ANDERSON DE ARRUDA TINO**  
Data: 07/12/2023 14:18:51-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Msc. Alan Anderson de Arruda Tino  
Universidade Federal do Oeste do Pará

Documento assinado digitalmente  
 **MATHEUS DINIZ PINTO DE MORAIS**  
Data: 07/12/2023 14:08:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Msc. Matheus Diniz Pinto de Moraes  
Universidade Federal do Oeste do Pará

Documento assinado digitalmente  
 **REGIS QUESADA CASQUET**  
Data: 07/12/2023 14:29:10-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Msc. Regis Quesada Casquet  
Universidade Federal do Oeste do Pará

Dedico este trabalho ao meu pai, Aiezer Duarte  
(in memoriam).

## AGRADECIMENTOS

À luz divina que guia meus passos, agradeço a Deus por me manter viva e saborear a alegria desta realização.

Às minhas queridas mães, Joana e Jociléia, pilares de força e amor, cujos exemplos de vida orientam meu caminho.

À minha família e amigos, agradeço por cada incentivo, por cada oração silenciosa que me apoiaram em momentos de dúvida, fortalecendo meu espírito.

Ao Feliph Rocha, cujo suporte e compreensão foram essenciais. Sua presença foi lugar seguro nos momentos desafiadores durante a elaboração deste trabalho.

Aos engenheiros João Eleutério e Marcos Gonçalves, agradeço imensamente pelo apoio e encorajamento tão necessário e decisivo para o início da minha carreira.

Aos professores da Ufopa, minha segunda casa, onde por tantos anos encontrei conhecimento, ajuda e inspiração. A cada um de vocês, minha gratidão por serem parte essencial desta jornada acadêmica e pessoal.

Ao meu professor e orientador Msc. Matheus Diniz pela sua compreensão e instruções valiosas, fundamentais para a condução deste trabalho.

*“Todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus, daqueles que são chamados segundo o seu propósito.”  
(Romanos 8:28)*

## RESUMO

Este trabalho aborda a influência da infraestrutura de mina na eficiência das operações de lavra em minas a céu aberto, com foco nos projetos geométrico, estrutural, funcional e de drenagem das estradas de mina. Através de uma revisão bibliográfica e uma abordagem qualitativa, foi possível desvendar a complexidade das interações entre a infraestrutura e a operacionalidade eficiente da lavra. Os resultados destacam a importância do planejamento meticuloso do projeto geométrico das estradas, alinhado com o método de mineração e as características específicas do local. Além disso, a integridade estrutural, a funcionalidade operacional e um sistema de drenagem eficaz emergem como elementos cruciais para a segurança e produtividade das operações minerárias. O estudo reforça a necessidade de um planejamento infraestrutural holístico, que considere as variáveis operacionais e ambientais, contribuindo para a literatura existente ao reiterar a importância de uma visão integrada da infraestrutura de mina. As limitações da abordagem qualitativa e da revisão bibliográfica são reconhecidas, sugerindo-se para pesquisas futuras a integração de métodos quantitativos e estudo de caso. O trabalho conclui enfatizando a complexidade e a importância do planejamento da infraestrutura de mina, servindo como base para futuras pesquisas que visem aprimorar as práticas de engenharia de minas e a eficiência operacional das lavras a céu aberto.

**Palavras-Chaves:** Infraestrutura de mina, projeto geométrico, projeto estrutural, projeto funcional, projeto de drenagem.

## ABSTRACT

This paper discusses the influence of mine infrastructure on the efficiency of mining operations in open-cast mines, with a focus on the geometric, structural, functional and drainage design of mine roads. Through a literature review and a qualitative approach, it was possible to unravel the complexity of the interactions between infrastructure and efficient mining operations. The results highlight the importance of meticulously planning the geometric design of the roads, in line with the mining method and the specific characteristics of the site. In addition, structural integrity, operational functionality and an effective drainage system emerge as crucial elements for the safety and productivity of mining operations. The study reinforces the need for holistic infrastructure planning that considers operational and environmental variables, contributing to the existing literature by reiterating the importance of an integrated view of mine infrastructure. The limitations of the qualitative approach and the literature review are acknowledged, and future research suggests integrating quantitative methods and investigating the application of innovative technologies. The paper concludes by emphasizing the complexity and importance of mine infrastructure planning, serving as a basis for future research aimed at improving mining engineering practices and the operational efficiency of open-pit mines.

**Keywords:** Mine infrastructure, geometric design, structural design, functional design, drainage design.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de custo relacionada ao carregamento e manutenção de estradas em mineração .....	20
Figura 2 - Tipos de estrada de: mina(a), rodoviária pavimentada(b), florestal(c) e vicinal (d) .....	22
Figura 3 - Projeto estrutural de estrada de mina.....	25
Figura 4 - Distância de parada ( $D_p$ ) .....	32
Figura 5 - Valores de distância de parada para $f = 0,4$ .....	34
Figura 6 - Configurações geométricas indicando diferentes condições de segurança .....	35
Figura 7 - Leiras .....	37
Figura 8 - Construção das leiras .....	38

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Tempo de reação de frenagem em função do peso do caminhão.....	33
---	----

## LISTA DE SIGLAS

NR	Norma Regulamentadora
NRM	Norma Regulamentadora de Mineração
SAE	Society of Automotive Engineers
D <sub>p</sub>	Distância de parada
D <sub>v</sub>	Distância de visibilidade
M	Afastamento
D <sub>1</sub>	Distância de percepção e reação
D <sub>2</sub>	Distância de frenagem
L	Curva vertical
V	Número de vias
X	Largura do veículo (m)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>16</b>
<b>3 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>4 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 Infraestrutura de mina.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2 Estradas de mina .....</b>	<b>19</b>
<b>4.3 Projeto Geométrico.....</b>	<b>22</b>
<b>4.4 Projeto estrutural .....</b>	<b>24</b>
<b>4.5 Projeto Funcional .....</b>	<b>25</b>
<b>4.6 Projeto de Drenagem.....</b>	<b>27</b>
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>6.1 Projeto geométrico.....</b>	<b>30</b>
6.1.1 Distância de parada.....	31
6.1.2 Distância de visibilidade.....	34
6.1.3 Largura.....	36
6.1.4 Leira de proteção .....	37
6.1.4 Grade .....	39
<b>6.2 Projeto estrutural .....</b>	<b>39</b>
<b>6.3 Projeto funcional .....</b>	<b>40</b>
<b>6.7 Projeto drenagem .....</b>	<b>42</b>

<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da mineração é um pilar fundamental para o progresso econômico de muitas nações, atendendo as contínuas demandas por minerais essenciais à dinâmica da vida moderna. Neste contexto, a infraestrutura ligada às operações de lavra assume um papel de destaque, podendo ser descrita como a espinha dorsal que interliga e viabiliza as diversas fases de um projeto minerário. Thompson e Visser (2008), ressaltam a importância dessa infraestrutura ao mencionar que uma estrada em más condições não só compromete a eficiência no transporte de minério, mas também aumenta os riscos e desafios para a indústria como um todo, impactando diretamente a segurança dos trabalhadores e a integridade das operações.

Dessa forma, é fundamental que o planejamento das estradas de mina dedique uma atenção especial aos critérios específicos relacionados à geometria, estrutura, função e sistemas de drenagem. Sendo necessário atender a esses parâmetros em cada fase, reconhecendo sua importância intrínseca e como estão interconectados. Somado a isso, é preciso também que as estradas estejam em total conformidade com as leis ambientais e as regulamentações de saúde e segurança, garantindo o dimensionamento adequado e específico desses elementos de infraestrutura de mina (VIEIRA, 2013).

Nessa perspectiva, o foco desta pesquisa está na compreensão de como os parâmetros construtivos das vias de acesso influenciam diretamente na eficiência das operações de mineração a céu aberto. A questão central que conduz esta investigação é: "De que forma a infraestrutura de mina, por meio dos parâmetros construtivos das vias de acesso, pode influenciar no desempenho das operações de lavra?". À medida que este estudo, avança, será possível identificar e analisar os fatores-chave que determinam a eficácia dessa infraestrutura e, assim, contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes na indústria de mineração.

Isso será feito através da descrição das características construtivas fundamentais, avaliando sua relevância no desempenho das operações de lavra. Além disso, serão analisados os principais impactos decorrentes da escolha desses parâmetros construtivos específicos na segurança das operações de mineração a céu aberto. Ademais, ao final deste trabalho, será possível compreender ainda mais a importância da infraestrutura de mina como um elo crítico que liga o potencial geológico de um depósito mineral à sua transformação em recursos valiosos para a sociedade.

## **2 JUSTIFICATIVA**

A infraestrutura de uma mina desempenha um papel de extrema importância no que diz respeito à eficiência e segurança das operações de extração mineral. Ela engloba o planejamento e a construção de acessos de transporte, viabilizando a criação de um sistema interno de tráfego destinado ao deslocamento de minérios, material estéril e diversos insumos dentro das instalações da mina.

Nesse sentido, a infraestrutura de mina, por meio do adequado dimensionamento de recursos e da implementação de estratégias operacionais que considerem as particularidades de cada empreendimento e as características do minério explorado, desempenha um papel central no suporte à consecução do plano estratégico de produção, ao mesmo tempo em que assegura a integridade das operações.

É fundamental enfatizar que uma abordagem simplista em relação à infraestrutura de mina, considerando-a apenas como uma atividade de suporte secundária, pode acarretar riscos que afetam negativamente as operações de extração mineral. Portanto, ressalta-se a importância de realizar um levantamento detalhado e uma análise dos impactos reais que a infraestrutura de mina pode provocar para as atividades de lavra. Além disso, torna-se imprescindível considerar os critérios utilizados na escolha dos elementos construtivos dos projetos implementados em minas a céu aberto. Tal estudo contribuirá significativamente para a aplicação das técnicas e modelos construtivos que melhor favoreçam a otimização das operações de extração mineral. Dessa forma, assegura-se a eficiência operacional, a segurança das atividades e a maximização dos resultados em empreendimentos de mineração a céu aberto.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo Geral**

Analisar as principais características construtivas dos acessos de mina utilizadas em projeto de mineração a céu aberto, bem como compreender de que maneira esses parâmetros exercem influência sobre o desempenho das operações unitárias de lavra.

### **3.2 Objetivos Específicos**

- Identificar e descrever as características construtivas fundamentais dos acessos de mina em projetos de mineração a céu aberto;

- Avaliar a relevância e o impacto dessas características na eficiência das operações de lavra;
- Analisar os principais impactos da escolha de parâmetros construtivos específicos na segurança das operações de mineração a céu aberto.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Infraestrutura de mina

A infraestrutura de mina compreende uma rede robusta de elementos, sistemas e equipamentos, todos planejados para oferecer suporte e otimizar as operações unitárias de lavra. Além disso, essa infraestrutura é planejada e executada em sintonia com o método de extração mineral adotado. Thompson e Visser (2008) elucidam essa perspectiva ao enfatizar a importância da localização e disposição das estradas de transporte de mina. Estes autores argumentam que tais estradas não apenas facilitam o trânsito de materiais e equipamentos, mas também são moldadas e influenciadas pelo método de mineração escolhido, bem como pelas características geológicas e topográficas do depósito em questão.

A eficácia da infraestrutura de mina pode exercer impacto considerável no ritmo de produção de uma mina, o que, por sua vez, afeta diretamente a sua produtividade. Um exemplo desse fato é a escolha inadequada dos parâmetros construtivos das estradas de mina, que pode resultar em desgastes prematuros dos equipamentos de transporte, como caminhões, devido às adversidades nas condições de tráfego.

Além disso, vale ressaltar que uma infraestrutura de mina mal planejada pode representar riscos à segurança dos trabalhadores. Especificamente, estradas mal projetadas podem potencialmente levar a acidentes graves. Esse cenário é ainda mais crítico em operações de mineração a céu aberto, onde há uma movimentação constante de maquinário pesado, aumentando a necessidade de uma infraestrutura eficiente e segura.

Ao abordar a concepção e implementação da infraestrutura de mina, Freire (2019) destaca a necessidade de uma abordagem holística que vai além do simples atendimento às demandas específicas de um depósito mineral. O autor sugere que cada empreendimento minerário, com suas singularidades geológicas, topográficas e operacionais, exige uma estratégia especializada que aborde de maneira singular as características associadas à logística, transporte, processamento e segurança. Esta perspectiva ressoa com as observações de Thompson e Visser (2008), sugerindo uma interconexão entre a estrutura física da mina e a abordagem estratégica adotada.

Vieira (2013) também ressalta a relevância dos acessos à cava, destacando sua influência direta em variáveis econômicas, como custos de produção e manutenção. Isso porque os elementos da infraestrutura, desde as vias de acesso até os sistemas de drenagem, não só

facilitam o acesso ao local da mina, mas também assegura a movimentação otimizada do minério e do material estéril impactando diretamente na produção. Além disso, esses componentes proporcionam as condições operacionais ideais, fundamentais para o funcionamento eficaz dos equipamentos de lavra, consolidando a interdependência e a importância estratégica de cada parte dessa rede operacional.

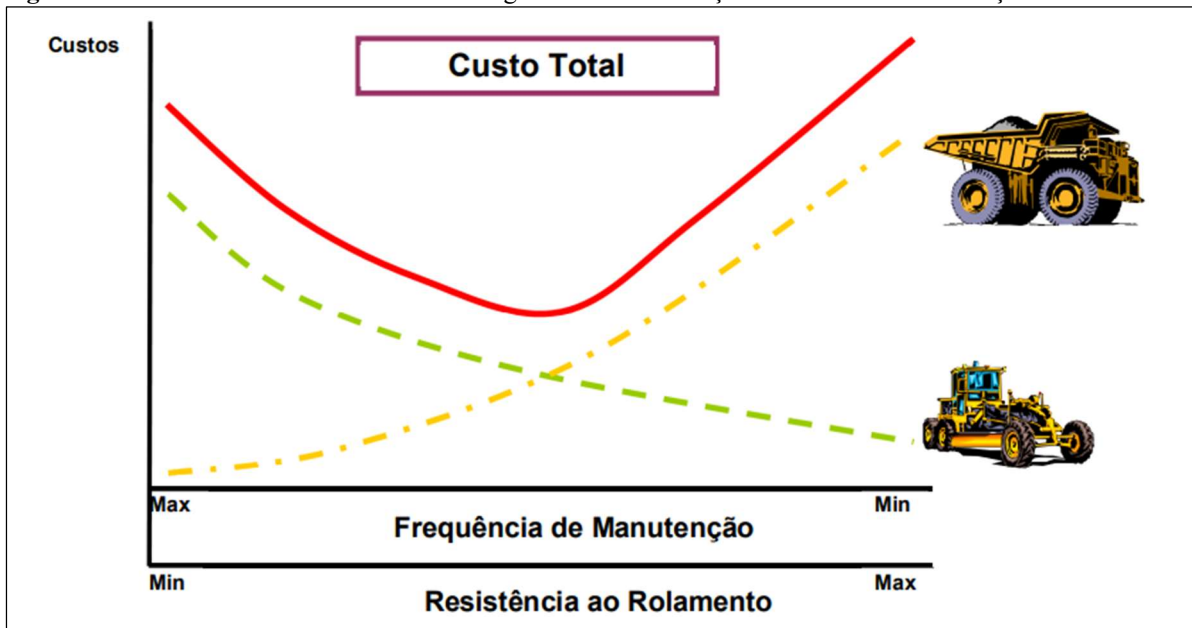
Sendo assim, a infraestrutura de mina, quando adequadamente planejada e executada, não apenas otimiza a produção, mas também promove a segurança operacional e a sustentabilidade ambiental. Ela desempenha um papel vital na gestão de riscos geotécnicos, na redução de impactos ambientais e na eficiência operacional, alinhando-se assim às práticas mineradoras contemporâneas e responsáveis.

#### **4.2 Estradas de mina**

As estradas de mina funcionam como as principais artérias de transporte dentro do empreendimento minerário. Elas não apenas facilitam o acesso, mas também garantem a movimentação contínua e segura de equipamentos pesados, minério, estéril, pessoas e materiais essenciais para as operações. A qualidade e a integridade dessas vias são importantes para garantir que as atividades dentro do empreendimento sejam realizadas de maneira eficiente e sem interrupções. Além disso, quando bem projetada e mantida pode significar a diferença entre operações que fluem suavemente e aquelas atormentadas por atrasos e custos adicionais.

É importante destacar que, de acordo com Freire (2019), à medida que se investe mais em estudos e planejamento para o projeto das estradas de acesso em uma mina, os custos de manutenção dessas estradas tendem a diminuir. Essa redução nos custos de manutenção também tem um impacto positivo nos custos gerais de transporte na mina. No entanto, é necessário considerar que existe um ponto ótimo em termos de custos, onde o investimento em estudos adicionais resultaria em reduções significativas nos custos de manutenção ou transporte. Na figura 1 podemos observar a relação entre investimento em construção e manutenção e economia de custos.

**Figura 1** - Curva de custo relacionada ao carregamento e manutenção de estradas em mineração



Fonte: Modificado de Vieira (2013). Modificado de Thompson e Visser (1999).

Por isso, é importante considerar o papel desempenhado pelas estradas que por definição, conforme Dicionário Michaelis (2009), são genericamente descritas como "Caminho, geralmente largo, que liga duas ou mais localidades (cidades, regiões, países etc.) destinado ao trânsito de homens, animais e veículos; via, via de tráfego.". Contudo, essa definição não consegue capturar completamente a sua importância específica na indústria mineral. Essas estradas não se limitam a caminhos de tráfego; elas são as vias que viabilizam o fluxo ininterrupto de minério extraído, estéril removido, equipamentos pesados, pessoal de operação e insumos essenciais dentro do empreendimento minerário.

Para além disso, o planejamento e construção dessas estradas precisam corresponder aos desafios singulares enfrentados na mineração. Como já dito, isso envolve considerar a topografia do terreno, as condições geológicas, especificidades dos equipamentos e, sobretudo, da segurança dos trabalhadores que delas dependem para acessar áreas críticas do empreendimento.

Um ponto de destaque a ser considerado é natureza não pavimentada das estradas de mina. Há um motivo para essa particularidade, trata-se de uma resposta adaptativa às dinâmicas particulares das operações de lavra. À medida que a lavra avança, o layout da mina sofre modificações contínuas, seja pela expansão das frentes de trabalho, relocação de pilhas de estéril ou ajustes na logística de transporte. Por isso, a ausência de pavimentação nas estradas

permite uma maior flexibilidade e adaptabilidade às mudanças operacionais, facilitando reconfigurações rápidas e eficientes conforme as necessidades da mina evoluem.

As estradas não pavimentadas geralmente têm superfícies mais ásperas e podem ser compostas por materiais naturais ou estabilizados. De acordo com Baesso e Gonçalves (2003) podem empregar uma variedade de materiais, como cascalhos, seixos, pedregulhos, agregados artificiais ou solos estabilizados naturalmente, dependendo das características do material disponível. Na perspectiva da infraestrutura de mina, essa adaptação dos materiais de revestimento às condições específicas da mina é crucial para garantir a eficácia e a durabilidade das estradas de mina. Além disso, a seleção adequada dos materiais desempenha um papel na redução dos custos de manutenção.

No entanto, é importante ressaltar que as estradas de mina apresentam características singulares que as distinguem de outros tipos de estradas, independentemente de serem pavimentadas ou não. Um dos aspectos mais característico está relacionado à natureza dos esforços e solicitações a que estão sujeitas, devido ao peso dos equipamentos utilizados, como os caminhões fora de estrada que transportam material estéril, minério entre outros, que são consideravelmente mais pesados do que os caminhões regulares (SOUSA, 2011). Essa característica impõe desafios adicionais no projeto e na manutenção das estradas de mina, uma vez que a capacidade de carga e a resistência do pavimento são fatores críticos a serem considerados.

Além disso, Mamede (2018) afirma que pesquisas em engenharia mostram que, nas operações de mineração a céu aberto, os caminhões de grande porte são particularmente mais vulneráveis em termos de segurança devido a fatores como suas dimensões avantajadas, peso significativo e complexidade operacional. Estas características impõem restrições de segurança que devem ser consideradas durante a fase de desenho dos acessos. Assim, a elaboração do projeto deve ser fundamentada em uma análise das propriedades e limitações desses veículos, permitindo a criação de vias que colaborem com eliminação de riscos contribuindo para um ambiente de trabalho mais seguro.

A figura abaixo ilustra claramente a distinção entre quatro tipos de estradas, destacando as particularidades das estradas de mina:

**Figura 2** - Tipos de estrada de: mina(a), rodoviária pavimentada(b), florestal(c) e vicinal (d)



Fonte: SOUSA, 2011.

É relevante destacar que os requisitos de projeto, métodos construtivos e técnicas de manutenção aplicados a estradas rodoviárias pavimentadas, vicinais de terra e florestais podem ser adaptados e aplicados com proveito em estradas de mina, desde que devidamente ajustados às particularidades dos projetos minerários. Esse processo demanda uma abordagem criteriosa e organizada durante todas as fases, desde a concepção até a construção e a operação das estradas de mina.

### 4.3 Projeto Geométrico

O projeto geométrico de uma estrada de transporte em uma mina precisa estar incorporado no processo de planejamento da infraestrutura. Conforme Thompson (2008), esse aspecto é influenciado pelos fatores: a escolha do método de mineração para o empreendimento e as características geométricas da área de mineração, que incluem o corpo de minério e a topografia do terreno. Dentro do contexto da infraestrutura de mina, o projeto geométrico assume significativa importância, pois ele determina as características físicas e operacionais das estradas.

Pontes Filho (1998) apresenta um conceito de projeto geométrico que associa os elementos físicos da estrada com parâmetros operacionais. Ou seja, irá tratar das características geométricas do traçado ao mesmo tempo que se preocupa com características de operação dos veículos, reação dos motoristas, segurança e eficiência das estradas e volume de tráfego. Também é essencial garantir que as vias sejam seguras para os equipamentos que as utilizam, como exemplo os caminhões e maquinário pesado. Isso envolve a consideração de elementos como curvas adequadas, inclinações apropriadas e sinalização eficaz para evitar acidentes.

Além disso, conforme destacado por Vieira (2013), o projeto busca criar condições que favoreçam a operação eficiente desses equipamentos. Isso implica na minimização do desgaste dos componentes dos veículos, como pneus, chassi, motor e transmissão. Ao adotar essa abordagem, o projeto almeja otimizar os custos relacionados à manutenção e, ao mesmo tempo, estender a vida útil dos equipamentos, aspecto crucial para a eficiência e a rentabilidade das operações

De acordo com Tannant e Regensburg (2001), o constante aumento no tamanho dos caminhões, especialmente os caminhões fora-de-estrada, afeta diretamente os parâmetros do projeto geométrico. Consequentemente, essa tendência está resultando no aumento das dimensões das pistas dessas estradas. À medida que os caminhões se tornam maiores e mais pesados, as estradas de mina precisam ajustar seus parâmetros de projeto, como a largura da via, o raio das curvas e a inclinação das estradas, para acomodar esses veículos maiores. Isso é importante para garantir que os caminhões possam circular com segurança, sem riscos de acidentes ou danos à infraestrutura da via.

Kaufman e Ault (1977) são autoridades no assunto e destacam a importância de parâmetros geométricos. Esses parâmetros incluem aspectos como a largura da estrada, a distância necessária para a frenagem de veículos, a distância de visibilidade para garantir a segurança, a inclinação máxima sustentável das rampas, a configuração das curvas verticais e horizontais, a superelevação (inclinação das curvas), a inclinação para direcionamento do escoamento de água, a coordenação entre alinhamentos horizontal e vertical, e o espaçamento entre as leiras de segurança. Isso demonstra a complexidade do projeto geométrico, que deve atender a requisitos específicos do contexto minerador.

Thompson e Visser (2008) corroboram essas considerações, sugerindo que as características geométricas das estradas de mina podem ser estabelecidas com base em formulações já consolidadas na pavimentação rodoviária, com adaptações específicas ao

ambiente de mineração. Isso destaca a importância de compartilhar princípios e técnicas entre essas áreas relacionadas.

Ademais, o projeto geométrico não se limita apenas à geometria da via. Ele também visa promover a segurança operacional e otimização do desempenho dos equipamentos em circulação. A seleção cuidadosa do local de implantação da estrada é de suma importância, levando em conta fatores como a topografia do terreno e a minimização de distâncias, uma vez que a redução de custos é uma prioridade constante.

#### **4.4 Projeto estrutural**

O projeto estrutural é uma etapa importante do projeto de pavimento, sendo responsável pelo dimensionamento das camadas que constituem a estrutura da estrada além de definir o arranjo do pavimento, considerando sua espessura e tipos de material disponível, de modo a garantir a compatibilidade com o material *in situ* e o volume de tráfego previsto para a vida útil das estradas (THOMPSON; VISSER, 1996).

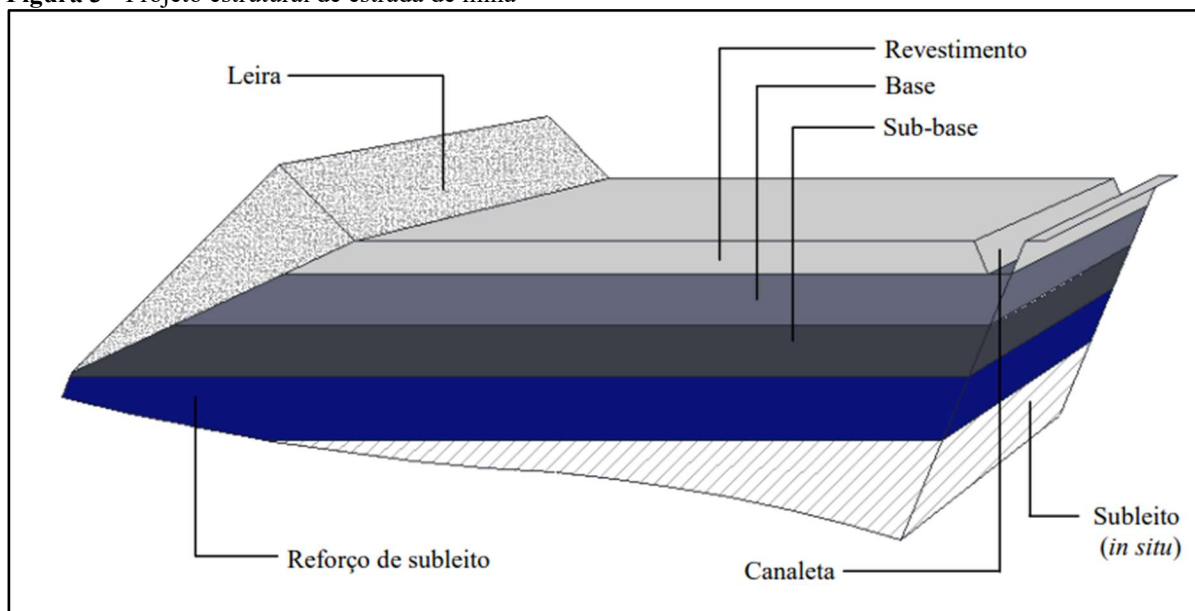
Conforme Massetti et al. (2011), um pavimento bem dimensionado incorpora camadas estruturais, como a base, a sub-base e o subleito conforme Figura 3. Vale mencionar que o revestimento, a camada superior, desempenha papel funcional e não faz parte do projeto estrutural. As demais camadas são cuidadosamente planejadas e construídas acima do terreno natural do subleito existente, com o propósito de conferir a capacidade de suporte, durabilidade e desempenho necessários ao pavimento.

Cada uma das camadas possui funções específicas que contribuem para a integridade e durabilidade do pavimento como um todo. O projeto é elaborado de forma a garantir que o pavimento seja capaz de resistir de maneira satisfatória às cargas do tráfego e às variáveis ambientais, assegurando sua qualidade ao longo do tempo. Adicionalmente, em alguns casos, uma camada de reforço ao subleito pode ser incluída no projeto, com a finalidade de distribuir mais adequadamente as tensões que atingem o subleito em função do seu suporte.

O revestimento é a camada superficial que proporciona tração, resistência à abrasão e transmite as cargas para as camadas inferiores. A base é responsável por distribuir as tensões transmitidas pelos pneus, protegendo a sub-base de alterações volumétricas. A sub-base, geralmente composta por material granular, promove a drenagem e reduz os efeitos da expansão e contração do subleito. O reforço do subleito é aplicado para aumentar a capacidade de resistência da fundação e aliviar os esforços sobre ela. O subleito é a camada inferior de um

pavimento que suporta as cargas aplicadas e pode ser composto pelo terreno natural. (BALBO, 2007; BRANCO et al., 2006; MASETTI et al., 2011; VIEIRA, 2013).

**Figura 3** - Projeto estrutural de estrada de mina



Fonte: SOUSA (2011).

Para garantir uma infraestrutura robusta e adaptada às especificidades do local é comum usar para a estruturação das camadas de pavimentação materiais provenientes da região da mina, ou em áreas adjacentes. De acordo com Bezerra Neto (2004), um aspecto fundamental no projeto de pavimentação é garantir a coerência entre os materiais que formam as diversas camadas do pavimento, isso é vital para a longevidade. Além disso, é importante destacar que as camadas estruturais das estradas de mina devem possuir capacidade de suporte e espessura adequadas para resistir a rupturas, evitar deformações excessivas e absorver as cargas, prevenindo a deformação no terreno *in situ* (VIEIRA, 2013).

#### 4.5 Projeto Funcional

No que diz respeito ao projeto funcional, este é caracterizado pela escolha adequada dos materiais para a camada de revestimento das estradas, visando garantir uma superfície de estrada durável e resistente ao desgaste (THOMPSON, 2000). A seleção dos materiais de revestimento é uma etapa que requer atenção especial, uma vez que esses materiais precisam atender a requisitos específicos relacionados às operações, tais como controle de poeira, conforto na condução, aderência e resistência ao rolamento (MAMEDE, 2018).

É importante a gestão adequada desse revestimento por muitos motivos, entre eles está o controle de material particulado suspenso, que muitas vezes é originado pela abrasão de partículas soltas. Esta poeira, além de representar um risco à saúde dos trabalhadores devido à inalação, pode comprometer a visibilidade nas vias, aumentando o potencial de acidentes. Além disso, a dispersão de partículas finas no ambiente pode afetar ecossistemas próximos e comunidades do entorno.

Por isso, no projeto funcional, é essencial considerar soluções para minimizar a geração de poeira, um desafio comum em estradas de mina. Diversas técnicas são mencionadas na literatura, incluindo sistemas de aspersão fixa, aspersão por caminhões-pipa, aspersão de material betuminoso, aplicação de areia grossa ou pedrisco seguidos de compactação, bem como o uso de líquidos estabilizantes e polímeros para selar a camada de revestimento (MASETTI et al., 2011; FERREIRA, 2007; TANNANT; REGENSBURG, 2001). A escolha da técnica adequada depende das condições específicas da estrada de mina, sua vida útil prevista e o orçamento disponível.

De acordo com Brasil (2006), é fundamental diferenciar os diferentes níveis do pavimento, considerando que as tensões cisalhantes devidas ao tráfego são mais significativas próximo à superfície, enquanto nas camadas inferiores predominam as tensões verticais. Portanto, é essencial que o revestimento seja dimensionado com uma qualidade superior em relação à resistência e compressão, comparativamente à base e às camadas inferiores. Esse princípio de dimensionamento é reforçado por Bernucci et al. (2008), que destacam a atenuação dos esforços transmitidos pelos veículos à medida que se aprofundam na estrutura do pavimento.

Materiais granulares são frequentemente escolhidos para compor as camadas de revestimento e base devido às suas vantagens em termos de custo de construção e manutenção, além de proporcionar boas características de tração, aderência e baixa resistência ao rolamento (MASETTI et al., 2011). Em algumas situações, é possível adotar abordagens simplificadas, como o uso de um único material para o revestimento primário, especialmente em estradas de mina com subleitos muito competentes ou quando as solicitações de carga são relativamente baixas. No entanto, em muitos casos, a seleção e composição dos materiais de revestimento envolve uma análise criteriosa e a consideração de múltiplos fatores para atender aos requisitos de desempenho (REIS, 2010).

#### 4.6 Projeto de Drenagem

O projeto de drenagem é de suma importância, pois garante o bom funcionamento das estradas e minimiza os impactos negativos causados pelo acúmulo de água. Embora muitas vezes negligenciado, esse aspecto é crucial para a manutenção eficaz das vias, especialmente em períodos de chuva conforme elucidado por Pereira (2000). Esta não é apenas uma questão de manter as vias em condições operacionais, mas também de mitigar os efeitos adversos resultantes do acúmulo de água. Em períodos de inverno intenso, a ausência de um sistema de drenagem eficaz pode comprometer a integridade das estradas.

Para garantir o controle adequado do escoamento superficial nas estradas de mina, é essencial a aplicação de dispositivos de drenagem que envolvem desde a inclinação transversal da estrada até canaletas, canais, drenos e bueiros (KENNEDY, 1977).

A inclinação transversal da via, por sua vez evita a dispersão do fluxo na superfície da via. A determinação desse ângulo deve ser feita considerando a textura da superfície por onde os veículos passam, oscilando entre 2% para vias de superfície mais lisa e 4% para aquelas de superfície mais ásperas. É importante considerar que em estradas com rampas superiores a 5%, a inclinação transversal deve ser menor para evitar deslizamentos (KAUFMAN; AULT, 1977).

Oliveira Filho e et al., (2010) destacam a importância de dispositivos adicionais, como valetas de proteção, sarjetas e dissipadores de energia, que são fundamentais para canalizar e direcionar a água de forma eficaz. A saturação das pistas e a formação de poças d'água, como Sousa (2011) aponta, podem ser evitadas com a seleção e implementação desses dispositivos. Tannant e Regensburg (2001) complementam, observando que as dimensões das canaletas de passagem devem ser adaptadas às condições locais de frequência.

Além disso, Sousa (2011) ressalta a necessidade de considerar a drenagem subterrânea, especialmente em áreas de cortes e aterros com permeabilidade limitada. Em tais circunstâncias, a implementação de bases granulares com drenos pode ser importante para a estabilidade da estrada.

Souza (2011) também enfatiza, que a drenagem seja vista não apenas como um subconjunto dentro dos outros projetos, mas como uma entidade independente e crítica para a operação. Portanto, é necessário adotar uma abordagem abrangente que considere não apenas a inclinação transversal, mas também dispositivos de drenagem adequados, como caixas coletoras e dissipadores de energia.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Bastos e Ferreira (2016) enfatizam que a pesquisa, sob a ótica científica, é uma metodologia organizada para a formação de conhecimento, voltada ao entendimento de um objeto de estudo específico. Através dela, é possível elucidar dúvidas, esclarecendo vários temas. A consistência de toda pesquisa reside na conformidade com princípios científicos robustos, garantindo a confiabilidade dos resultados.

De acordo com Prodanov (2013), a pesquisa aplicada é aquela voltada à geração de conhecimentos com práticas específicas, centradas na resolução de problemas concretos de um contexto específico. Nesta linha de pensamento, o presente trabalho se inseriu na categoria de pesquisa aplicada, analisando como a infraestrutura da mina afeta a eficiência das operações de lavra. O objetivo é que os resultados desta pesquisa tenham uma aplicabilidade direta na área de mineração a céu aberto.

No que diz respeito aos propósitos deste estudo, a abordagem científica foi identificada como descritiva e explicativa. Esta classificação metodológica nasceu da pretensão de elucidar as características construtivas dos acessos de infraestrutura de mina e de investigar as causas e efeitos associados ao desempenho das operações unitárias de lavra.

Reforçando essa visão, Bastos e Ferreira (2016) afirmam que uma pesquisa descritiva tem como objetivo esmiuçar características de uma dada população ou fenômeno, identificando situações específicas associações entre variáveis. Já uma pesquisa explicativa foca nas causas e justificativas dessas características.

No âmbito acadêmico, uma pesquisa qualitativa é percebida como aquela que explora a relação dinâmica entre a realidade e a subjetividade do pesquisador. Em essência, ela prioriza a interpretação e a atribuição de significados às considerações, distanciando-se de abordagens numéricas (PRADANOV, 2013).

No contexto deste trabalho, foram adotadas tal perspectiva qualitativa, promovendo uma análise meticulosa das características construtivas e suas implicações nas operações de lavra. A opção por esta abordagem é vital para captar nuances e aspectos não quantificáveis que impactam o desempenho operacional.

A técnica de coleta de dados empregada neste trabalho é uma revisão bibliográfica. Conforme destacado por Lakatos e Marconi (2001, p. 183), a revisão bibliográfica engloba toda a literatura já divulgada sobre o assunto em questão, incluindo publicações independentes, boletins informativos, jornais, obras literárias, estudos, trabalhos acadêmicos, dissertações,

materiais de mapeamento, entre outros. O objetivo é familiarizar o pesquisador com todas as informações e registros, eles são escritos ou visuais, relacionados ao tópico em análise

Este método possibilita ao investigador aprofundar-se em um conjunto robusto de informações preexistentes, permitindo uma análise crítica e sistematizada dos conteúdos publicados. Esta abordagem não apenas oferece um panorama amplo sobre o tema investigado, mas também fornece uma fundamentação teórica sólida para as análises e conclusões do estudo.

Em relação aos critérios estabelecidos para a coleta de dados nesta revisão bibliográfica, optou-se por não delimitar um recorte temporal específico. A ausência de restrições quanto ao ano das publicações decorre da intenção de englobar uma gama mais abrangente e diversificada de literatura, reconhecendo que trabalhos fundamentais podem ser encontrados em qualquer momento histórico e que a riqueza de uma revisão se potencializa ao considerar tanto estudos pioneiros quanto descobertas recentes no campo de investigação.

As línguas priorizadas para este estudo foram o inglês e o português, tendo em vista que representam idiomas amplamente utilizados em produções acadêmicas de renome e abrangem uma considerável parcela dos trabalhos de relevância no cenário internacional. No que concerne à análise das informações, adotou-se uma leitura exploratória do material selecionado, imergindo-se em uma abordagem qualitativa. Tal estratégia permite uma interpretação mais aprofundada e crítica das fontes, destacando nuances e significados subjacentes ao conteúdo, contribuindo assim para uma compreensão holística dos temas investigados.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

No presente capítulo, serão apresentados os resultados da revisão bibliográfica conduzida, enfocando os principais aspectos relacionados à infraestrutura de mina e às estradas de mina, conforme abordados no referencial teórico. Adicionalmente, este capítulo se dedica a uma análise crítica das implicações dos resultados obtidos em relação aos objetivos inicialmente estabelecidos para esta pesquisa.

### **6.1 Projeto geométrico**

Conforme Thompson (2008), elucida, o aspecto da infraestrutura de mina, em particular o projeto geométrico das estradas de mina, é influenciado principalmente por dois fatores fundamentais: a escolha do método de mineração para o empreendimento e as características geométricas da área de mineração, que englobam o corpo de minério e a topografia do terreno. Esses dois fatores desempenham papéis interdependentes e têm um impacto substancial no desenvolvimento e na eficiência das operações de mineração.

A escolha do método de mineração é um ponto de partida crítico. Diferentes métodos, como mineração a céu aberto ou subterrânea, têm requisitos específicos de infraestrutura. Por exemplo, em minas a céu aberto, é comum que as estradas de mina desempenhem um papel central na movimentação eficiente de material, equipamentos e pessoal. Por outro lado, as características geométricas da área de mineração são igualmente cruciais. A topografia do terreno desempenha um papel fundamental na determinação do layout das estradas de mina. Terrenos montanhosos, planos ou acidentados afetam diretamente o traçado das estradas, a inclinação das rampas e a necessidade de infraestrutura de suporte, como muros de contenção ou sistemas de drenagem.

Além disso, as características do corpo de minério, como sua forma, profundidade e distribuição geológica, também têm um impacto direto na localização das estradas de mina. Em minas a céu aberto localizadas em terrenos montanhosos, por exemplo, a seleção de rotas para estradas de mina pode afetar significativamente os custos e a logística da mineração, uma vez que a escavação e transporte de material em terrenos íngremes podem ser mais desafiadores e dispendiosos. Por isso, estradas de mina devem ser projetadas de modo a proporcionar acesso adequado às áreas de mineração mais produtivas, maximizando a eficiência operacional.

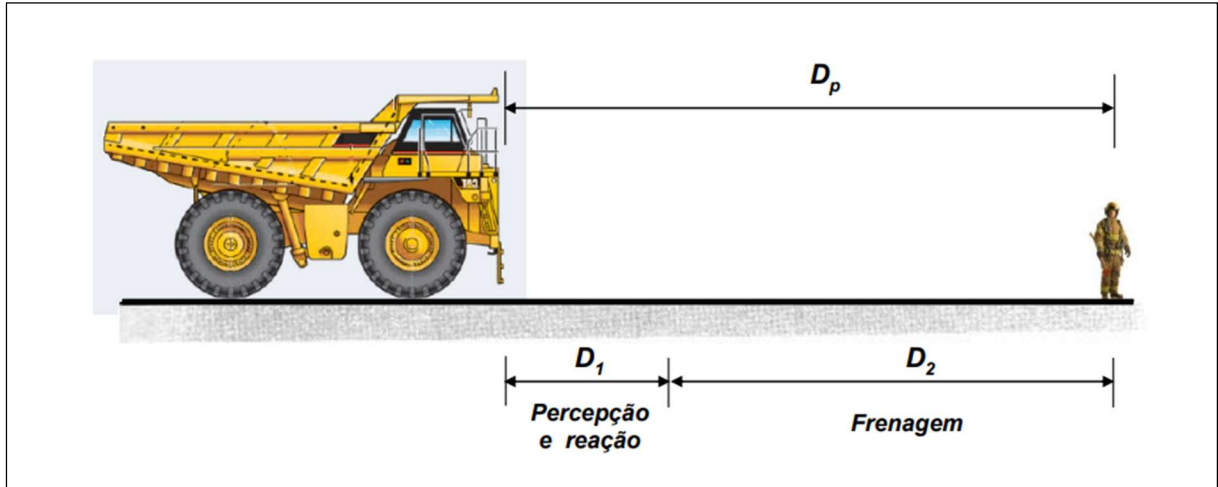
### 6.1.1 Distância de parada

De acordo com os estudos de Thompson (1996), a distância de parada é definida como o espaço percorrido por um equipamento desde o momento em que o motorista ou operador detecta a presença de um obstáculo até que o veículo pare completamente. Este conceito é fundamental para a segurança viária, uma vez que determina a distância necessária para evitar colisões e acidentes nas estradas.

No contexto específico das estradas de mina, a consideração da distância de parada é ainda mais importante. Como destacado por Kaufman e Ault (1977), essas estradas são projetadas para acomodar veículos que muitas vezes possuem pesos extremamente elevados. O peso considerável desses veículos afeta significativamente sua capacidade de frenagem. Portanto, a determinação precisa da distância de parada de cada equipamento torna-se um desafio complexo.

A interligação dessas ideias sugere que as estradas de mina precisam ser projetadas levando em consideração não apenas a capacidade de frenagem típica dos veículos, mas também as variações causadas pelo peso e pelas condições específicas da operação de mineração. Isso implica em considerar uma margem de segurança significativa ao projetar essas estradas, a fim de acomodar não apenas a distância de parada média, mas também situações adversas que possam surgir devido a fatores como carga pesada, aderência reduzida ou emergências inesperadas.

Conforme a Figura 4, a distância de parada ( $D_p$ ) é composta por duas parcelas distintas, que desempenham papéis críticos na capacidade de um condutor ou operador de equipamento de reagir a uma emergência. A primeira parcela é a distância de percepção e reação ( $D_1$ ), que representa o espaço que o condutor ou operador precisa para perceber a presença do obstáculo, tomar uma decisão de parar e começar a frenagem. Essa fase envolve o tempo de reação do indivíduo, que pode variar de acordo com fatores como atenção, velocidade e condições de iluminação. A segunda parcela é a distância de frenagem ( $D_2$ ), que corresponde à distância que o veículo ou equipamento percorre enquanto está sendo freado até que ele pare completamente.

**Figura 4** - Distância de parada ( $D_p$ )

Fonte: MASSETI ET AL (2011).

A  $D_2$  é influenciada por diversos fatores, incluindo a velocidade do veículo, as condições da via, a aderência dos pneus e a eficiência do sistema de freios. Em condições ideais, a  $D_2$  seria a menor possível, mas na prática, é importante considerar uma margem de segurança para a frenagem eficaz. A compreensão dessas duas parcelas que compõem a distância de parada é fundamental para o projeto de estradas e o estabelecimento de limites de velocidade seguros.

Kaufman e Ault (1977), criaram um método para calcular a distância necessária para um veículo parar com segurança, e esse método foi desenvolvido com base em pesquisas e estudos anteriores realizados pela Society of Automotive Engineers (SAE) sobre as restrições e limitações relacionadas à distância de parada de veículos. A distância de parada pode ser obtida através da Equação (1).

$$D_P = \frac{1}{2} g t^2 \sin \theta + v_0 t + \left[ \frac{(g t \sin \theta + v_0)^2}{2g(f - \sin \theta)} \right] \quad (1)$$

O cálculo considera vários parâmetros, incluindo:

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$t$  = tempo de parada (s);

$\theta$  = grade da rampa, positivo para baixo (graus);

$f$  = coeficiente de atrito do pneu (contato estrada/pneu);

$v_0$  = velocidade do veículo (m/s);

O tempo total de parada ( $t$ ) é composto por duas parcelas distintas que refletem as ações do motorista e do veículo durante uma situação de frenagem. ( $t_1$ ) é a primeira parcela do tempo total de parada e reflete o tempo necessário para o motorista perceber um obstáculo e iniciar a frenagem. Geralmente, é estimado em 1,5 segundos, mas pode variar com base nas condições na atenção do motorista. O tempo de reação de frenagem ( $t_2$ ) é o período em que o veículo leva para iniciar a frenagem após o motorista decidir frear. Isso abrange desde o momento em que o motorista aciona os freios até o início efetivo da desaceleração do veículo. Para este último, os valores específicos podem variar dependendo do equipamento, mas quando não há informações precisas do fabricante, podem ser usados valores padrão fornecidos por organizações como a Society of Automotive Engineers (SAE).

**Tabela 1** - Tempo de reação de frenagem em função do peso do caminhão

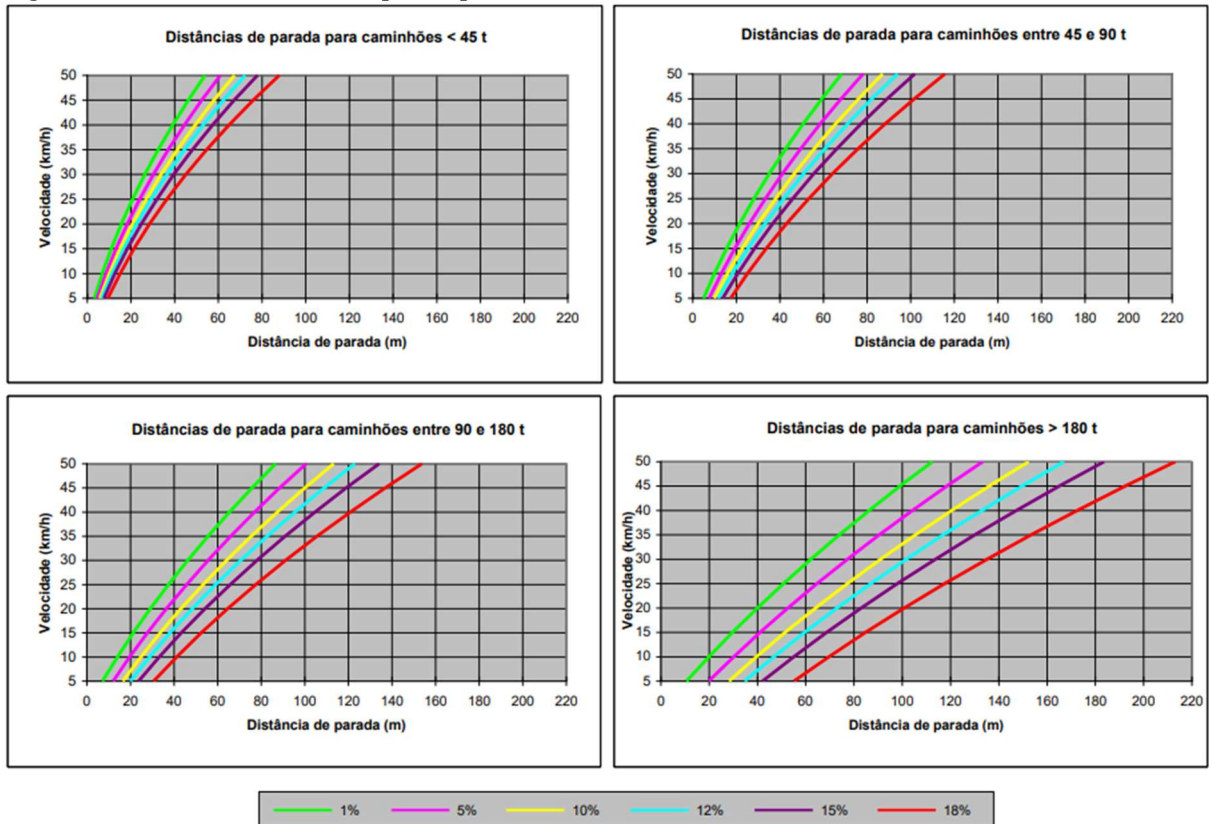
<b>Peso do caminhão</b>	<b>Tempo de reação de frenagem <math>t_2</math> (s)</b>
< 45	0,5
45 < t < 90	1,5
90 < t < 180	2,75
> 180	4,5

Fonte: MASETTI et al. (2011).

Na figura 5 Masetti et al. (2011) elaborou representações gráficas das distâncias de parada para diferentes valores de peso de caminhão, variando também a velocidade e a inclinação da rampa utilizando a equação mencionada anteriormente no texto como base para os cálculos.

Em última análise, a aplicação adequada dos conceitos relacionados à distância de parada, incluindo cálculos precisos e a implementação de medidas de segurança rigorosas, é fundamental para mitigar riscos substanciais. Além de proteger vidas e ativos, essa abordagem também contribui para a eficiência operacional a longo prazo, reduzindo custos associados a acidentes e garantindo um ambiente de trabalho seguro.

**Figura 5** – Valores de distância de parada para  $f = 0,4$



Fonte: MASSETI ET AL (2011).

### 6.1.2 Distância de visibilidade

A distância de visibilidade é um fator crítico no projeto geométrico de estradas, pois está diretamente ligada à segurança. Como definido por Masetti et al. (2011), ela se refere à área visível ao operador ou motorista, o que inclui não apenas o que está imediatamente à frente do veículo, mas também as áreas periféricas. Essa visibilidade é essencial para que o motorista possa perceber e reagir a tempo a condições de estrada e obstáculos potenciais.

Kaufman e Ault (1977) expandem esse conceito, enfatizando que a distância de visibilidade deve ser suficiente para que, mesmo em altas velocidades, um veículo tenha espaço suficiente para parar sem colidir com um obstáculo inesperado. Este princípio é incorporado no conceito de “distância de parada”, que é a soma da distância percorrida durante o tempo de reação do motorista mais a distância percorrida durante o tempo de frenagem do veículo.

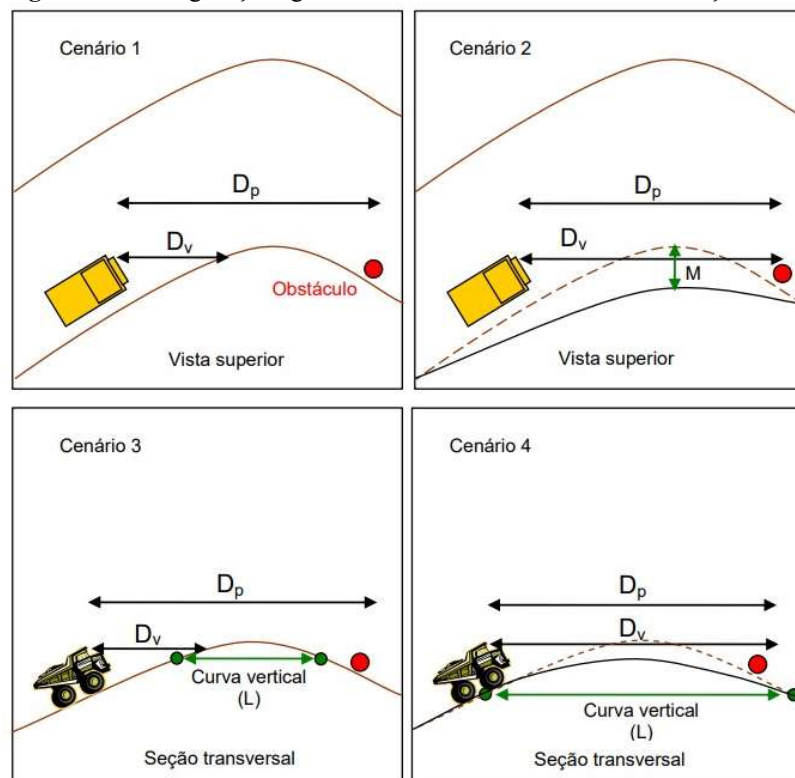
Monenco (1989) diz que frequentemente, a distância visibilidade pode ser comprometida por elementos como diques de berma, escarpas rochosas acentuadas, vegetação espessa ou construções adjacentes. Tais obstáculos obstruem a linha de visão, particularmente em trechos curvos, onde a percepção antecipada de riscos é fundamental.

A Figura 6 ilustra este conceito por meio de quatro cenários distintos, oferecendo uma representação visual dos problemas e das soluções pertinentes. No primeiro cenário, a limitação da visibilidade é evidente, com o obstáculo posicionado de tal maneira que a  $D_v$  é inadequada, representando um risco significativo. A solução proposta para este cenário, conforme sugerido por Mamede (2018), envolveria o aumento do raio de curvatura ou o alargamento dos taludes, removendo assim o perigo ao expandir a  $D_v$  para equiparar ou superar a  $D_p$ .

O segundo cenário exemplifica uma condição ideal onde os ajustes geométricos foram aplicados — a  $D_v$  agora é igual à  $D_p$ , criando um ambiente de trânsito mais seguro, onde os motoristas têm tempo suficiente para reagir e parar, caso necessário.

Similarmente, nos cenários 3 e 4, a questão da visibilidade em curvas verticais é abordada. O terceiro cenário mostra uma situação de visibilidade comprometida, potencialmente perigosa, que é prontamente corrigida no quarto cenário por meio do alongamento da curva vertical, o que melhora a  $D_v$  e, conseqüentemente, a segurança geral da via.

**Figura 6** – Configurações geométricas indicando diferentes condições de segurança



Fonte: Mod Thompson e Visser (2008).

### 6.1.3 Largura

Segundo a Norma Regulamentadora de Mineração (NRM) 13 (Brasil, 2001), a largura das pistas de rolamento em minas a céu aberto deve ser estabelecida com base na largura do maior veículo que por ela transitará. De maneira didática e objetiva, a norma especifica que para pistas simples, a largura deve ser no mínimo o dobro da largura do maior veículo. Para pistas duplas, onde o tráfego se dá nos dois sentidos simultaneamente, a largura mínima deve ser o triplo.

Esta diretriz serve a vários propósitos críticos na infraestrutura de mina:

- **Segurança:** Ao garantir que a pista seja suficientemente larga, cria-se um corredor seguro para a passagem de veículos, reduzindo o risco de colisões e acidentes.
- **Manutenção e Emergências:** Em caso de emergência ou quando um veículo necessita de manutenção e fica imobilizado na pista, a largura extra permite que outros veículos passem sem impedimentos. Isso evita o congestionamento e interrupção total do fluxo de veículos, o que poderia levar a atrasos significativos na produção.
- **Flexibilidade Operacional:** Uma pista mais larga oferece flexibilidade, permitindo que a operação se adapte a diversas situações sem a necessidade de modificações significativas na infraestrutura. A mina pode acomodar veículos de diferentes tamanhos e realizar ajustes na logística de transporte com facilidade.
- **Eficiência na Produção:** A fluidez do trânsito é vital para a eficiência. Uma pista bem dimensionada reduz o tempo de espera e otimiza o ciclo operacional dos veículos, o que é essencial para atingir as metas de produção.

A NR-22 (Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração) determina que as vias principais de circulação devem ser mantidas desobstruídas e em condições seguras de tráfego, e devem ser dimensionadas considerando o porte dos maiores equipamentos em uso na mina, de forma semelhante à NRM-13.

Um critério técnico definido por Tannant e Regensburg (2001) para determinar a largura mínima necessária para uma via de acesso em projetos de mineração a céu aberto ou estradas em geral é apresentado na equação (2).

$$L = (1,5 * V + 0,5) * X \quad (2)$$

Onde:

L = largura da estrada (m)

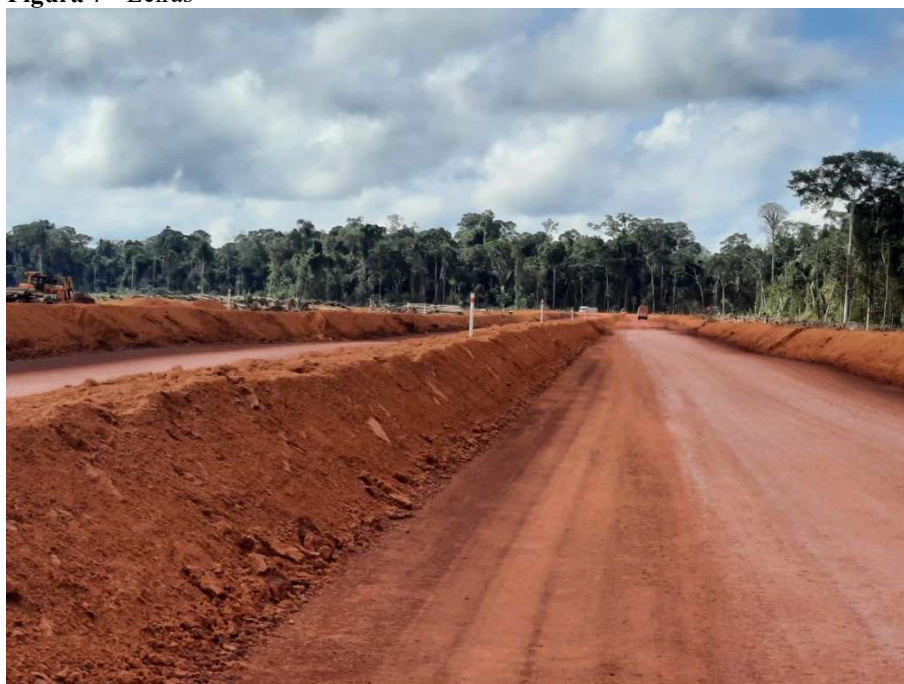
V = número de vias

X = Largura do veículo (m)

#### 6.1.4 Leira de proteção

As leiras de proteção são estruturas fundamentais para a segurança, configuradas para mitigar os riscos associados ao tráfego de veículos pesados. A Norma Regulamentadora 22 (NR-22) estabelece que a altura mínima das leiras deve ser ao menos metade do diâmetro do maior pneu dos veículos em circulação, fornecendo um parâmetro de segurança para deter ou redirecionar veículos desgovernados e servindo como um marcador visual que delimita as bordas das vias. Na Figura 7 podemos observar um exemplo dessas estruturas

**Figura 7 - Leiras**



Fonte: Próprio autor (2023).

Mamede (2018) ressalta a diferenciação funcional entre leiras convencionais e centrais, detalhando que as primeiras são colocadas nas laterais das estradas para impedir ultrapassagens acidentais, enquanto as segundas normalmente podem ser posicionadas em áreas de declive acentuado, atuando como uma contenção adicional. A construção dessas leiras aproveita materiais disponíveis na própria mina, sendo a sua forma geométrica—triangular ou trapezoidal—crucial para a efetividade na contenção e direcionamento dos veículos, conforme Figura 8.

**Figura 8** - Construção das leiras



Fonte: Próprio autor (2023).

Por outro lado, Thompson e Visser (2008) argumentam que a altura regulamentar pode não ser suficiente, propondo que a leira tenha, no mínimo,  $2/3$  do diâmetro do pneu do maior veículo para aumentar a eficiência da barreira em situações críticas. Esta perspectiva sugere que as regulamentações existentes podem necessitar de ajustes para atender as demandas de segurança em cenários operacionais diversos.

Ao fazermos uma avaliação contínua dos riscos associados à integridade das leiras concluiremos que processo não apenas inclui a consideração da frequência de incidentes anteriores, mas também requer uma adaptação às mudanças operacionais e às condições ambientais que possam influenciar a estabilidade dessas estruturas. É essencial que esta análise seja realizada e acompanhada de inspeções e manutenções regulares para assegurar que as leiras de proteção mantenham sua eficácia.

#### 6.1.4 Grade

O gradiente, também conhecido como inclinação, é a inclinação vertical de uma rampa em relação à horizontal, geralmente expressa em percentual. Como destacado por Masetti et al. (2011), Oliveira Filho et al. (2010), e Tannant e Regensburg (2001), um gradiente bem projetado é essencial para a eficiência e segurança operacional.

Um gradiente ideal deve ser o mais regular e constante possível, evitando mudanças bruscas em curtos intervalos. Grades irregulares podem causar esforços excessivos no câmbio de transmissão dos equipamentos de transporte, resultando em diminuição da velocidade e eficiência operacional. Além disso, grades inadequadas podem levar a um aumento no consumo de combustível, desgaste mecânico e custos de manutenção, como observado por Masetti et al. (2011) e reiterado por Oliveira Filho et al. (2010).

A escolha do gradiente ideal envolve a análise das características topográficas e geométricas da estrada, bem como a performance dos caminhões utilizados. Grades muito pronunciados exigem redução de velocidade nas descidas para garantir distâncias de parada seguras e frequentes reduções de marcha nas subidas, impactando negativamente a produtividade. Kaufman e Ault (1977) sugerem que a inclinação de estradas de mina geralmente é limitada a 10%, e gradientes maiores que 8% devem ser evitados por questões de segurança.

É comum a adoção de grades que variam entre 8 e 10%, mas sempre devem ser consideradas as especificações dos manuais dos equipamentos de transporte e as limitações geométricas das rampas. Um gradiente mal dimensionado pode resultar em riscos significativos de segurança, além de impactar a eficiência operacional e aumentar os custos operacionais.

## 6.2 Projeto estrutural

O projeto estrutural de estradas de mina constitui uma tarefa complexa e dinâmica. Esta complexidade deriva não apenas da necessidade de sustentar a intensa carga operacional característica do setor, mas também de assegurar a longevidade e eficiência destas vias com a menor manutenção possível. Segundo Hugo (2005), uma estrada de mina bem projetada é aquela que permanece íntegra e funcional sob o rigoroso teste do uso contínuo e pesado sem necessitar de manutenções frequentes. Por isso, a importância de um planejamento detalhado e a seleção de materiais de alta qualidade para a infraestrutura, capazes de suportar o tráfego pesado e constante de equipamentos de mineração.

As cargas impostas pelo transporte em operações mineiras excedem em muitas aquelas encontradas em estradas convencionais. Esta realidade exige que cada camada do pavimento – revestimento, base, sub-base e subleito – seja meticulosamente projetada e construída. O revestimento deve fornecer não apenas tração e resistência à abrasão, mas também adaptabilidade às variações climáticas e minimização da geração de poeira, como Sengoz (2014) aponta. As bases são cruciais na distribuição de tensões do tráfego, evitando deformações significativas e garantindo estabilidade, uma necessidade sublinhada por Thompson e Visser (2008). A sub-base e o subleito, embora muitas vezes negligenciados, desempenham papéis fundamentais na estabilidade global da estrutura do pavimento, adaptando-se às alterações geográficas locais e assegurando a durabilidade do sistema.

No entanto, quando o projeto estrutural falha em antecipar corretamente as cargas impostas pelos caminhões de mineração, inicia-se uma cadeia de implicações técnicas e operacionais profundamente prejudiciais. Deformações no pavimento resultam na geração de sulcos e trilhas, diminuindo a segurança operacional e aumentando o risco de acidentes, um perigo destacado por Balbo (2007). O sobredimensionamento das cargas pode levar a uma falha progressiva na estrutura do pavimento, desencadeando uma sequência de fadiga dos materiais que culmina em reparos custosos e na interrupção da produção.

Além disso, as estruturas deformadas elevam a resistência ao rolamento, impactando negativamente a eficiência de combustível e acelerando o desgaste do veículo, o que, por sua vez, eleva os custos operacionais e de manutenção. A necessidade de manutenção recorrente e as consequentes paralisações operacionais, interferem diretamente na produtividade e na eficiência econômica da mineração.

### **6.3 Projeto funcional**

O projeto funcional de um pavimento é uma etapa que exige uma seleção de materiais para a camada de revestimento, tendo em vista o cumprimento de critérios de economia, conforto e segurança veicular. A distinção das mecânicas nas diversas camadas do pavimento é importante, conforme destacado por Brasil (2006), pois a superfície está sujeita a tensões cisalhantes mais intensas devido ao tráfego, enquanto as camadas inferiores absorvem superfícies verticais preponderantes. A capacidade do revestimento de resistir e distribuir essas contribuições é vital, uma vez que é uma interface direta com os veículos.

A qualidade e o desempenho do revestimento são de suma importância, como apontam Bernucci et al. (2008), que enfatizam como os esforços transmitidos pela circulação veicular se atenuam com a profundidade do pavimento. Isso implica que a camada de revestimento deve apresentar características superiores em termos de resistência e capacidade de compressão em comparação com as camadas mais profundas. Se o dimensionamento dessa camada não for adequado, pode haver um comprometimento da durabilidade do pavimento, elevação dos custos de manutenção e, potencialmente, riscos à segurança dos usuários da via, visto que irregularidades na superfície podem levar a um aumento do risco de acidentes.

A aplicação de materiais granulares, conforme Masetti et al. (2011) destacam, é uma escolha técnica e econômica tanto para as camadas de revestimento quanto para a base do pavimento. Eles oferecem uma superfície com boa tração e aderência, além de apresentarem baixa resistência ao rolamento, o que se traduz em estradas mais seguras e confortáveis para o tráfego. A importância dessa seleção reside não apenas na funcionalidade imediata, mas também nas implicações de longo prazo para a manutenção e custo-benefício da infraestrutura de transportes.

Um projeto inadequado do revestimento (funcional) pode resultar. Adicionalmente, a penetração de água, que pode ser prevenida por um revestimento bem executado, é uma causa comum de deterioração do pavimento, levando a uma série de danos como buracos e erosões, que exigirão reparos dispendiosos.

Na elaboração do projeto funcional, é essencial abordar métodos para controlar a geração de poeira, um subproduto nocivo da interação entre o pavimento e os veículos, especialmente em áreas de mineração e estradas não pavimentadas. Segundo Masetti et al. (2011), estratégias como a instalação de sistemas de aspersão e o uso de caminhões-pipa são comuns, embora muitas vezes se revelem ineficazes devido à evaporação rápida e condições climáticas adversas. A presença excessiva de poeira não apenas reduz a visibilidade, colocando em risco a segurança dos motoristas, mas também pode levar a problemas respiratórios para a população local, além de impactar na produção devido a paradas operacionais por questões de segurança.

Ferreira (2007) investiga alternativas como a aspersão de materiais betuminosos e a aplicação de areia grossa ou pedrisco, compactados posteriormente, enquanto Tannant e Regensburg (2001) listam líquidos estabilizantes e polímeros como métodos eficazes para

minimizar a poeira, atuando na impermeabilização da camada de revestimento. Tais técnicas não apenas combatem a geração de poeira, mas também conferem uma solução mais duradoura em comparação com a utilização de materiais simplesmente encontrados na mina. Estas abordagens criam uma camada selante sobre a estrada, indicada para vias com longo período de utilização. A aplicação destas soluções revela a importância de um projeto de revestimento bem pensado e implementado, capaz de mitigar a erosão e a deterioração, prolongando a vida útil da via e promovendo um ambiente mais limpo e seguro.

### **6.7 Projeto drenagem**

A concepção de um sistema de drenagem eficiente é um pilar fundamental para a sustentabilidade e a segurança de empreendimentos minerários. A integridade das estradas de transporte e a proteção do meio ambiente estão intrinsecamente ligadas à capacidade de gerenciar eficientemente o escoamento das águas pluviais. A complexidade deste desafio é amplificada por variáveis como a topografia do local, as condições climáticas, as características do solo, o volume de água esperado e a infraestrutura existente (KAUFMAN E AULT, 1977).

A análise topográfica e hidrológica é importante para o entendimento do comportamento natural das águas na área de interesse, permitindo a identificação de áreas propensas à acumulação de água e a definição de rotas ótimas para o escoamento durante eventos pluviais. Modelos de simulação hidrológica são ferramentas valiosas nesse processo, fornecendo previsões acuradas do escoamento superficial e do volume de água a ser gerenciado pelo sistema de drenagem proposto.

A capacidade de drenagem deve ser projetada para lidar com eventos de precipitação de alta intensidade, evitando sobrecarga do sistema, transbordamento e erosão. Isso requer um cálculo preciso da vazão máxima esperada e o dimensionamento adequado de canais, bueiros e outras estruturas de drenagem. A utilização de materiais duráveis e resistentes, como tubulações de PEAD, e estruturas de concreto reforçadas, é essencial para assegurar a longevidade e a resiliência do sistema (KAUFMAN E AULT, 1977).

Bacias de sedimentação são componentes críticos para a contenção de sedimentos e outros materiais transportados pela água, cujo dimensionamento deve levar em conta a quantidade e o tipo de sedimento esperado, bem como a manutenção e limpeza das estruturas. Em locais onde as condições do solo são favoráveis, sistemas de infiltração podem ser

empregados para diminuir o volume de escoamento superficial, contribuindo para a recarga do lençol freático e a minimização do impacto em cursos d'água naturais.

Estruturas de proteção contra erosão, como escadas dissipadoras e revestimentos de canais, são necessárias em áreas com mudanças significativas de relevo ou onde as velocidades de escoamento são elevadas. Estas estruturas são fundamentais para a redução da energia da água, minimizando a erosão e protegendo a infraestrutura (KAUFMAN E AULT, 1977).

A manutenção regular e a facilidade de acesso para limpeza são aspectos que devem ser incorporados no design do sistema de drenagem, garantindo a funcionalidade contínua e a eficácia do sistema. Além disso, o impacto ambiental deve ser cuidadosamente considerado, evitando alterações significativas no escoamento natural e na qualidade da água, e implementando medidas de controle de poluição quando necessário.

Por fim, o sistema de drenagem deve estar em conformidade com todas as normas e regulamentos aplicáveis, abrangendo desde o projeto hidráulico até a proteção ambiental e a segurança. A negligência em qualquer um desses aspectos pode levar a consequências severas, como interrupções operacionais, danos à infraestrutura, riscos de segurança, impactos ambientais adversos, custos financeiros elevados, desafios de manutenção e redução da longevidade do projeto (KAUFMAN E AULT, 1977).

## 7 CONCLUSÃO

A pesquisa realizada teve como escopo a análise da influência da infraestrutura de mina na eficiência das operações unitárias de lavra em minas a céu aberto, com um enfoque detalhado nos projetos geométrico, estrutural, funcional e de drenagem das estradas de mina. Através de uma revisão bibliográfica abrangente e uma abordagem qualitativa, este estudo conseguiu desvelar a complexidade das interações entre esses elementos de infraestruturas e a operacionalidade eficiente da lavra.

Os resultados obtidos apontam para a importância crítica do projeto geométrico das estradas de mina, que deve ser meticulosamente planejado para alinhar-se com o método de mineração escolhido e as características geométricas específicas do local. Além disso, foi evidenciado que a integridade estrutural das vias de acesso, sua funcionalidade em termos de suporte às operações de mina e um sistema de drenagem eficiente são elementos que não podem ser negligenciados, sob pena de comprometer a segurança e a produtividade do empreendimento minerário.

A relevância prática dessas inferências é indiscutível para o campo da engenharia de mina. Elas reforçam a necessidade de um planejamento infraestrutural holístico, que vá além dos aspectos técnicos e considere as variáveis operacionais e ambientais inerentes a cada projeto. Este estudo contribui para a literatura ao reiterar a importância de uma visão integrada da infraestrutura de mina, que englobe todos os aspectos desde o projeto até a execução e manutenção das estradas de mina.

Diante do exposto, sugere-se para pesquisas futuras a integração de métodos quantitativos robustos e estudos de caso específicos, que possam avaliar o impacto direto dos diferentes aspectos da infraestrutura de mina na eficiência operacional. Seria igualmente valioso investigar a aplicação de tecnologias inovadoras no projeto e manutenção das estradas de mina, bem como a influência de variáveis ambientais e climáticas na durabilidade e funcionalidade dessas estruturas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Norma Reguladora da Mineração 10/2001 NRM-13 - Circulação e Transporte de Pessoas e Materiais. Brasília: Distrito Federal, [2001]. Disponível em: < [https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm\\_13.htm](https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_13.htm) >. Acesso em 30 de outubro de 2023.
- BAESSO, D. P; Gonçalves, F.L.R. Estradas rurais – Técnicas adequadas de manutenção. Florianópolis: DER, 2003. 236 p.
- BAESSO, Dalcio Pickler. Estradas rurais: técnicas adequadas de manutenção. Florianópolis: Departamento de Estradas e Rodagem, 2003. 236 p.
- BALBO, José Tadeu. Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos. São Paulo, SP, 2007.
- BASTOS, Maria Clotilde Pires; FERREIRA, Daniela Vitor. Metodologia científica. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras; ABEDA, 2008. 501 p. il.
- BEZERRA NETO, RS Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS). 2004. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luís Picado. Pavimentos Rodoviários. Almedina. Coimbra, Portugal, 2006
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 2006. 278 p.
- Brasil. Ministério do Trabalho. Norma Regulamentadora Nº 22 - Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. Brasília, DF, 2020.

FERREIRA, R. M. Dimensionamento de um pavimento experimental para o tráfego de caminhões fora-de-estrada em planta de mina. 2007. 277 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

FREIRE, Lucas de Almeida e Silva. Infraestrutura de Mina a Céu-Aberto: Atividades e Equipamentos. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Minas) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

HUGO, D. Haul road defect identification and condition assessment using measured truck response. 2005. 109 f. Dissertation (Master of Engineering in the Department of Mechanical and Aeronautical Engineering) – University of Pretoria.

KAUFMAN, W.; AULT, J.C. Design of Surface Mine Haulage Roads – A Manual. Information Circular 8758. Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1977. 68 p

KENNEDY, B. A. Surface Mining. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME) 2nd edition. Littleton – Colorado, 1990.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. Fundamentos de metodologia científica. 6. ed. 5. reimp. São Paulo: Atlas, 2007.

MAMEDE, Cláudia Ferreira. Dimensionamento estrutural de vias de acesso em empreendimentos mineiros. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2018.

MASETTI, L; Cláudio. M. e Costa, W. Manual de Estradas de Mina. Departamento de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos - Vale – 117 p., Belo Horizonte, 2011.

MICHAELIS, Moderno dicionário da língua portuguesa. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 2259p, São Paulo 2009 (Dicionários Michaelis).

MONENCO. Design Manual for Surface Mine Haul Roads. Draft report by Monenco Consultants Limited, Calgary, Alberta, 1989.

OLIVEIRA FILHO, W. L. de; FERNANDES, G.; SOUSA, L. M. L. S. de; COSTA FILHO, W. D.; RODRIGUES, C. A. F.; VAN HAM, G. H. J. Relatório de Inventário de Estradas de Acesso de Mina. Relatório interno. Convênio Vale UFOP, Ouro Preto, 2010

PEREIRA, Alessandra P. O. Subsídios para o Gerenciamento Ambiental na Implantação e Operação de Ferrovias. Dissertação IME, Rio de Janeiro, 2000

PONTES FILHO, G. Estradas de Rodagem Projeto Geométrico. São Carlos: 1998. 432 p.

PONTES FILHO, G. Estradas de Rodagem Projeto Geométrico. São Carlos: 1998. 432 p.

PRODONOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani César de. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013

REIS, M. D. S. Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra a céu aberto de minério de ferro dentro do quadrilátero ferrífero. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Programa de pós-graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto, 2014

SOUSA, Lilian Masetti Lobo Soares de; OLIVEIRA FILHO, Waldyr Lopes de; LIMA, Hernani Mota de. Dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 2012.

TANNANT, D. D. and REGENSBURG, B. Guidelines for mine haul road design. University of Alberta: School of Mining and Petroleum Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, 108 p., Canada, 2001

TANNANT, D. D. and REGENSBURG, B. Guidelines for mine haul road design. University of Alberta: School of Mining and Petroleum Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, 108 p., Canada, 2001

TANNANT, D. D. and REGENSBURG, B. Guidelines for mine haul road design. University of Alberta: School of Mining and Petroleum Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, 108 p., Canada, 2001.

THOMPSON, R. J. and VISSER, A. T. Mine haul design, construction and maintenance management. In: short course offered on 13 and 14 November 2008, Belo Horizonte, 2008

THOMPSON, R. J.; VISSER, A.T. Mine haul Road design, construction and maintenance management. Belo Horizonte: 2008. Note compiled for a short course at Vale.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A.T. Towards a mechanistic structural design method for surface mine haul roads. South Africa: 1996. Journal of the South African Institution of Civil Engineers. Volume 38 number 2 p 13-21

VIEIRA. João Carlos. Determinação e quantificação de elementos de relevância em infraestrutura de mina (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PARAUPEBAS. 2013.