



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



## **INFRAESTRUTURA DE MINA APLICADO AO PLANEJAMENTO DE LAVRA**

**PAULO ALBERTO COELHO**

**OURO PRETO - MG**

**2023**

**PAULO ALBERTO COELHO**

**INFRAESTRUTURA DE MINA APLICADO AO PLANEJAMENTO DE  
LAVRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

**Área de Concentração:** Lavra de Mina

**Orientador:** Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (*DEMIN/EM/UFOP*)

**OURO PRETO - MG**

**2023**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C672i Coelho, Paulo Alberto.  
Infraestrutura de mina aplicado ao planejamento de lavra.  
[manuscrito] / Paulo Alberto Coelho. - 2023.  
73 f.: il.: color., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Lavra de minas. 2. Minas e recursos minerais - Planejamento. 3.  
Mineração a céu aberto. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade  
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.015

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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Paulo Alberto Coêlho**

### **Infraestrutura de mina aplicada ao planejamento de lavra**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 11 de outubro de 2023

#### Membros da banca

Dr Hernani Mota de Lima - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr José Margarida da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr José Fernando Miranda (Universidade Federal de Ouro Preto)

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/10/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/10/2023, às 16:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0615681** e o código CRC **A383107B**.

*Todavia, como está escrito:*

*"Olho nenhum  
viu,  
ouvido nenhum ouviu,  
mente nenhuma imaginou  
o que Deus preparou  
para aqueles que o amam";*

*(1Co 2:9)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter mudado a minha vida e minha história e me permitir concretizar esse sonho.

À minha mãe Valéria de Fátima R. Coelho, pelo apoio incondicional e por sempre apoiar minhas decisões, te amo mãe!

Ao meu pai Francisco de Paula Coelho que me apoiou o tempo todo, pelo seu aporte financeiro mesmo quando as situações pareciam contrárias, te amo, pai!

À minha esposa, presente de Deus em minha vida, Maria Izabel M. Coelho, que comprou esse sonho junto comigo e me incentivou e me apoiou nessa jornada, te amo.

À minha irmã Leticia de Fátima Coelho, que sempre me incentivou, direta ou indiretamente, também te amo.

Aos demais companheiros de turma, com os quais compartilhei os mesmos sonhos e esperança, mas principalmente por todo o amadurecimento angariado junto a eles durante esses cinco anos de vida acadêmica e por todos os esforços que fizemos durante essa jornada.

Aos meus amigos, onde destaco entre eles Pablo Marllon que sempre me incentivou a correr atrás dos meus sonhos.

Ao corpo docente da Universidade Federal de Ouro Preto por todo conhecimento compartilhado, dos quais destaco a minha gratidão ao orientador deste trabalho Hernani Mota de Lima por sua credibilidade e paciência.

*“A persistência é o caminho do êxito.”*

*Charles Chaplin*

## RESUMO

A extração de um recurso mineral requer a sincronização precisa de vários parâmetros para atender às exigências da mina. Para viabilizar a extração de forma eficiente, é imprescindível que a infraestrutura ofereça suporte às operações de lavra, como a supressão da vegetação, a construção e a manutenção das rampas e acessos, os planos de drenagem e outras ações pertinentes. Se os parâmetros forem mal dimensionados ou ausentes, várias complicações podem afetar as atividades de lavra, prejudicando a produção. As estradas utilizadas na atividade de mineração são, em sua maioria, compostas por vias não asfaltadas. Caso não sejam construídas de acordo com os padrões de qualidade e elementos geométricos fundamentais, essas estradas podem não ser capazes de suportar o tráfego constante dos equipamentos, além de não garantirem a segurança necessária e o melhor desempenho dos equipamentos de produção. Como resultado dessas deficiências, ocorre uma redução direta na produtividade, o desgaste prematuro dos pneus e de componentes dos caminhões, bem como um uso excessivo e inadequado dos recursos de infraestrutura disponíveis. Embora a infraestrutura de mina tenha uma grande importância, existem poucas informações teóricas disponíveis sobre o assunto, demonstrando o quão particular é o processo de aprimoramento do plano estratégico de uma mina. O objetivo deste trabalho foi elucidar a relevância das operações de infraestrutura de mina, com ênfase na manutenção das vias para o sucesso das operações de lavra a céu aberto e outras atividades na indústria mineral, demonstrando o quão importante é esta operação para o planejamento de lavra e a lucratividade de uma empresa. Como o suporte teórico sobre o tema é escasso, foram apresentados os parâmetros operacionais de infraestrutura de mina utilizados na Mina de Ferro Casa de Pedra, da empresa CSN Mineração, localizada no município de Congonhas, no estado de Minas Gerais, a fim de tornar o assunto mais didático. A partir das informações levantadas, pode-se chegar a uma análise crítica e informacional sobre os vários parâmetros que podem estar associados a uma atividade de extração mineral, no que diz respeito à infraestrutura de mina e, ainda demonstrar quais as maiores problemáticas associadas à mesma e quais parâmetros podem atrapalhar todo um planejamento de lavra.

**Palavras – Chave:** Infraestrutura; Lavra; Planejamento; Mina a céu aberto; acessos.

## ABSTRACT

Extracting a mineral resource requires precise synchronization of multiple parameters to meet mine requirements. To enable efficient extraction, it is essential that the infrastructure supports mining operations, such as the suppression of vegetation, the construction and maintenance of ramps and accesses, drainage plans and other relevant actions. If the parameters are poorly dimensioned or absent, several complications can affect mining activities, harming production. The roads used in mining activities are, for the most part, made up of unpaved roads. If they are not built in accordance with quality standards and fundamental geometric elements, these roads may not be able to withstand the constant traffic of equipment, in addition to not guaranteeing the necessary safety and the best performance of production equipment. As a result of these deficiencies, there is a direct reduction in productivity, premature wear of tires and truck components, as well as excessive and inadequate use of available infrastructure resources. Although mine infrastructure is of great importance, there is little theoretical information available on the subject, demonstrating how particular the process of improving a mine's strategic plan is. The objective of this work was to elucidate the relevance of mine infrastructure operations, with an emphasis on maintaining roads for the success of open pit mining operations and other activities in the mineral industry, demonstrating how important this operation is for mining planning. and profitability of a company. As theoretical support on the topic is scarce, the operational parameters of mine infrastructure used in the Casa de Pedra Iron Mine, owned by the company CSN Mineração, located in the municipality of Congonhas, in the state of Minas Gerais, were presented, in order to make the more didactic subject. From the information collected, it is possible to reach a critical and informational analysis of the various parameters that may be associated with a mineral extraction activity, with regard to mine infrastructure, and also demonstrate the biggest problems associated with it. and which parameters can disrupt an entire mining plan.

**Keywords:** Infrastructure; Mining; Planning; Open pit mine; accesses.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - O Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, Geologia Simplificada.
- Figura 2 - Lavra de minério de ferro pelo método de bancadas em encosta.
- Figura 3 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, mostrando a localização da área de estudo.
- Figura 4 - Mapa geológico da porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero com a localização da área de estudo.
- Figura 5 - Lavra por bancadas na Mina Casa de Pedra.
- Figura 6 - Lavra em encosta.
- Figura 7 - Lavra em cava.
- Figura 8 - Parâmetros de um talude.
- Figura 9 - Manutenção de Berma.
- Figura 10 - Distância de parada.
- Figura 11 – Largura de acesso para caminhões CAT 789.
- Figura 12 - Altura de leira de segurança na mina.
- Figura 13 - Gradiente de acessos.
- Figura 14 - Inclinação e manutenção da estrada.
- Figura 15 - Curva empírica de custos de estradas de transporte em mineração.
- Figura 16 - Impactos das estradas na mineração.
- Figura 17 - Imagem da área operacional com a locação de acessos.
- Figura 18 - Etapas do dimensionamento das camadas do pavimento das estradas mineiras.
- Figura 19- Projeto de estrada de mina.
- Figura 20 - Inclinação de drenagem nas pistas.
- Figura 21 - Bacia dissipadora de energia.
- Figura 22 – Construção de estrutura de drenagem.
- Figura 23 – Caixa 04 Dique do Esmeril IV.
- Figura 24 – Canal enrocado do extravasor do *Sump* 4.
- Figura 25 – *Sump* 17 L 01 02.
- Figura 26 – Condições da pista de rolamento para acesso ao PCN 2.
- Figura 27 - Umectação das vias.
- Figura 28 - Variações de gradiente ao longo do acesso.
- Figura 29 - Tempo de transporte vazio do caminhão CAT 793C com variação da resistência total.

Figura 30 - Tempo de transporte carregado do caminhão CAT 793C com variação da resistência total.

Figura 31 - Influência da resistência de rolamento no desempenho de mina.

Figura 32 - Movimentação de carga caminhão vazio.

Figura 33 – Ciclo entre britador e a região do mascate.

Figura 34 – Ciclo entre britador e a região do mascate – Pressões na suspensão.

Figura 35 – Ciclo entre britador e a região do engenho.

Figura 36 – Ciclo entre britador e a região do engenho – Pressões na suspensão.

Figura 37 – Ciclo entre a região do engenho e o depósito Batateiro.

Figura 38 – Ciclo entre a região do engenho e o depósito Batateiro – Pressões na suspensão.

Figura 39 – Ciclo entre a região do mascate e o depósito Batateiro.

Figura 40 – Ciclo entre a região do mascate e o depósito Batateiro – Pressões na suspensão.

## LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

- DAR** – Drenagem Ácida de Rocha  
**DAM** – Drenagem Ácida de Mina  
**LSC** – Limite superior de controle  
**LIC** – Limite inferior de controle  
**D<sub>1</sub>** - distância de percepção e reação  
**D<sub>2</sub>** - distância de frenagem  
**D<sub>p</sub>** - distância de parada  
**α<sub>R</sub>** - Ângulo de inter-rampa  
**α<sub>o</sub>** - Ângulo global da cava  
**h<sub>R</sub>** - Altura máxima da inter-rampa  
**r** - largura da rampa  
**h<sub>o</sub>** - Altura máxima da cava/encosta  
**h<sub>β</sub>** - Altura da bancada  
**b** - Largura da bancada  
**α<sub>β</sub>** - Ângulo do talude

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
Objetivos Específicos.....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1. O minério de ferro .....	16
2.2. Principais regiões mineradoras de ferro do Brasil.....	17
2.2.1. Quadrilátero Ferrífero .....	17
2.3. Lavra a céu aberto .....	18
2.4 Infraestrutura de mina .....	19
2.4. Planejamento de lavra .....	20
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>24</b>
3.1 Características do projeto de análise.....	24
3.1.1 Localização.....	24
3.1.2 Método de lavra .....	26
3.1.3 Operações unitárias de lavra .....	28
<b>4 PARÂMETROS A SEREM ANALISADOS NA CONSTRUÇÃO DOS ACESSOS</b> ..	<b>33</b>
4.1 Distância de segmento .....	33
4.2 Projetos dos acessos de mina .....	34
4.2.1 Largura mínima dos acessos .....	34
4.2.2 Leiras de segurança .....	35
4.2.3 Inclinação de acesso .....	36

<b>5</b>	<b>DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DAS CAMADAS DE ESTRADAS DE MINERAÇÃO .....</b>	<b>38</b>
5.1	Construção, recuperação e manutenção de praças e pistas de rolamento .....	38
5.2	Tipos de projetos de estradas de mina .....	41
5.2.2	Projeto Estrutural .....	42
5.2.3	Projeto funcional .....	45
<b>6.</b>	<b>INFRAESTRUTURA E MANUTENÇÃO DO ACESSOS .....</b>	<b>46</b>
6.1	Drenagem nos acessos .....	46
6.1.1	Diques e/ou Bacias de Contenção de sólidos/Amortecimento .....	49
6.1.2	Gabiões.....	50
6.1.3	Sistema extravasor de gabiões e bacia de dissipação .....	50
6.1.4	Valas de drenagem em curva de nível.....	51
6.1.5	Drenagem na frente de lavra no período das chuvas .....	51
6.2	Tipos de defeitos característicos em acessos.....	52
6.3	Regularização de depósitos.....	54
6.4	Acessos .....	54
6.4.1	Rampas operacionais .....	55
<b>7.</b>	<b>INDICADORES DE DESEMPENHO.....</b>	<b>56</b>
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>61</b>
<b>10.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>

## INTRODUÇÃO

A extração de recursos minerais requer observância de uma série de parâmetros que devem trabalhar em conjunto para garantir o sucesso das atividades. Na fase de lavra, diversas ações relacionadas à infraestrutura de mina são necessárias, tais como a remoção da cobertura vegetal, construção de rampas e vias de acesso, sinalização da mina, entre outras. Essas ações são fundamentais para o êxito da extração do recurso mineral, e sem elas, problemas podem surgir, afetando não só a produção, mas também outras atividades da indústria mineral, como a recuperação da área impactada e o beneficiamento do minério.

A infraestrutura de mina é de extrema importância para a mineração, pois é responsável por fornecer o suporte necessário para a extração do recurso. Porém, a falta de planejamento, supervisão e manutenção adequada das vias pode levar a problemas que prejudicam a produção e afeta todo um planejamento de lavra executado. Apesar da relevância desse tema, há poucos estudos literários sobre o assunto, o que justifica a necessidade de uma análise crítica e informacional sobre a infraestrutura de mina.

Para construir um embasamento teórico sólido sobre o tema, são necessários dados e informações sobre as ferramentas de infraestrutura de mina. Dessa forma, será possível entender melhor a peculiaridade desse assunto e sua importância para as demais atividades da indústria mineral. Nesse sentido, este trabalho apresenta dados fornecidos pela CSN Mineração, que utiliza ferramentas de infraestrutura de mina na extração de minério de ferro, localizado no município de Congonhas, no estado de Minas Gerais.

## **OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso (TCC) é fornecer um embasamento teórico abrangente sobre a infraestrutura de mina, com ênfase na manutenção das vias aplicadas ao planejamento lavra, incluindo uma análise detalhada dos parâmetros considerados no dimensionamento dos mecanismos utilizados em projetos de mineração a céu aberto. Além disso, o trabalho visa demonstrar a importância da infraestrutura de mina para o sucesso das operações de lavra e como ela pode afetar diretamente o ritmo de produção de uma empresa.

### **Objetivos Específicos**

Destacar as particularidades das atividades de infraestrutura de mina e a importância da manutenção das vias para a execução adequada e a produção eficiente da empresa.

Discutir os possíveis impactos que podem ocorrer nas operações de lavra caso a infraestrutura de mina não seja devidamente executada.

## **JUSTIFICATIVA**

Para que as operações de uma mina sejam bem-sucedidas e estejam alinhadas com o plano estratégico de desenvolvimento, é essencial que a infraestrutura de mina seja dimensionada adequadamente. Caso contrário, as operações unitárias de lavra podem sofrer graves prejuízos, o que afetará o ritmo de produção como um todo.

Apesar de ser um fator crucial para o sucesso das atividades de lavra a céu aberto, a infraestrutura de mina muitas vezes é negligenciada e vista como uma parte integrante de outras operações, em vez de ser considerada no conjunto de operações unitárias essenciais.

Dada a escassez de informações teóricas sobre esse tema e sua participação fundamental no processo de extração mineral, é necessário realizar um estudo cuidadoso sobre essas atividades e os parâmetros que devem ser considerados para sua execução e manutenção, bem como os impactos que podem ocorrer caso essas atividades não

sejam realizadas adequadamente.

Para isso, foram utilizados como referência os parâmetros de infraestrutura de mina adotados pela CSN Mineração Mina Casa de Pedra. Serão abordados exemplos práticos de atividades de infraestrutura de mina, como a supressão da vegetação, confecção e manutenção dos acessos, planos de drenagem e a regularização do depósito para iniciar as atividades de recuperação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se sucinta revisão bibliográfica referente aos parâmetros mais relevantes ao tema de estudo, a fim de permitir um melhor esclarecimento e entendimento dos mesmos. Em princípio será efetuado um levantamento literário sobre minério de ferro, seguido do método de lavra mais empregado para a mesma, que corresponde à lavra em bancadas e, por fim, uma análise sobre infraestrutura de mina, foco deste trabalho.

### 2.1. O minério de ferro

O ferro geralmente é encontrado na natureza na forma de óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos. O minério é uma rocha natural que contém um conjunto de minerais, dos quais um ou mais minerais de interesse podem ser extraídos de maneira economicamente viável. A fração do minério que não tem valor econômico é denominada de ganga. Os principais minerais presentes no minério de ferro são a hematita, goethita e a magnetita. Embora haja vários outros minerais de ferro encontrados na natureza, eles não têm interesse econômico para extração de ferro. No entanto, ainda possuem interesse científico e tecnológico, como a akaganeite, que foi utilizada como material catódico em baterias de lítio recarregáveis (RAMALHAO, 2021).

A pirita,  $\text{FeS}_2$ , é o mineral sulfetado mais abundante e geralmente está associada a minérios contendo metais como cobre, urânio e ouro. Quando a pirita é descartada durante a extração desses metais, pode ser oxidada ao ser exposta ao meio ambiente, formando ácido sulfúrico e íon férrico oxidante. Esse fenômeno, chamado de drenagem ácida de rocha (DAR) ou drenagem ácida de mina (DAM), pode levar à acidificação de aquíferos, promover a solubilização de rochas e a mobilização de metais e outros elementos tóxicos associados ao minério. Por isso, é importante controlar a DAM/DAR, uma vez que afeta a viabilidade econômica e gera impactos ambientais e sociais em regiões de mineração.

A hematita,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , é o mais importante e mais abundante minério de ferro, enquanto a goethita,  $\alpha\text{-FeOOH}$ , é constituída por  $\text{Fe}^{3+}$  dispostos em uma estrutura octaédrica, coordenados a três átomos de oxigênio e três grupos  $\text{OH}^-$ . A magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , é um óxido de ferro de valência mista contendo  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ . Embora geralmente não-estequiométrica com deficiência de  $\text{Fe}^{3+}$ , a magnetita pode ser substituída por outros íons divalentes como  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$ .

Entre os minerais de ganga mais comuns, conforme Melo (2023), estão: quartzo,

o principal, caulinita e gibbsita.

O Brasil possui a quinta maior reserva de ferro do mundo, que é conhecida por ser uma das mais puras (DUARTE, 2019).

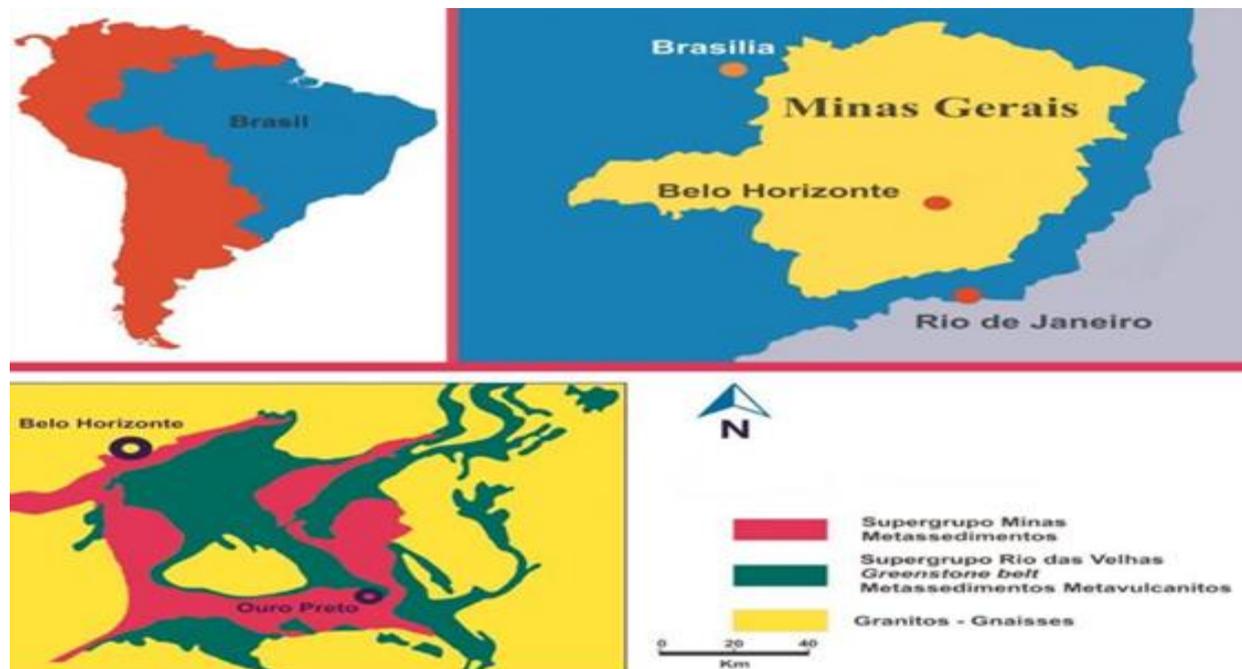
## 2.2. Principais regiões mineradoras de ferro do Brasil

No território brasileiro, há regiões de destaque na produção de minério de ferro, sendo as principais o Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, a Província Mineral de Carajás no Pará e o Maciço do Urucum no Mato Grosso do Sul.

### 2.2.1. Quadrilátero Ferrífero

A região do Quadrilátero Ferrífero está situada no estado de Minas Gerais e possui uma estrutura geológica que se assemelha a um quadrado. Sua área abrange cerca de 7.000 km<sup>2</sup> e se estende desde Ouro Preto, localizada no Sudeste do estado, até Belo Horizonte, no noroeste do estado. É a principal área de produção de minério de ferro do país. A partir dessa região da atividade mineradora, houve um rápido crescimento econômico e um desenvolvimento social predominantemente urbano. Além disso, foram construídas infraestruturas importantes, como rodovias, ferrovias e minerodutos, para apoiar essa indústria (SBG-MG, 2022).

**Figura1:** O Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, Geologia Simplificada.



Fonte: ROESER H.; ROESER P., (2010).

### 2.3. Lavra a céu aberto

A atividade mineradora é um processo complexo que envolve não só conhecimentos técnicos, mas também estratégicos, uma vez que é altamente dependente do mercado. Ela é composta por quatro pilares principais: prospecção, exploração, desenvolvimento, lavra e fechamento de Mina (CURI, 2017). Dependendo das condições, essas etapas podem ocorrer simultaneamente. A lavra, que engloba todas as operações necessárias para a extração de minérios, é fundamental para que o produto seja comercializado e esteja pronto para o beneficiamento.

Existem dois principais métodos de lavra: subterrâneo e a céu aberto. A seleção do método mais adequado depende de diversos fatores, como as condições geológicas e ambientais, aspectos sociais e legais e as condições econômicas e financeiras.

Os principais métodos de lavra para o minério de ferro são: a lavra aluvionar, por tiras e por bancadas, sendo este último o mais comum.

O método de lavra por bancadas é amplamente utilizado em minas onde o corpo mineralizado está coberto por uma camada subsuperficial de solo. As bancadas são desenvolvidas de cima para baixo, seguindo a extensão do corpo mineralizado até os limites finais mais profundos. Durante a extração, o minério é recuperado e o estéril é disposto em pilhas próximas à cava. No entanto, é importante lembrar que esse método possui alto custo operacional, já que requer grandes investimentos em equipamentos. Portanto, um planejamento inadequado pode comprometer a viabilidade econômica do empreendimento.

Quando possível, o material estéril pode ser depositado diretamente na cava, o que simplifica o processo de recuperação ambiental da área. A lavra por bancadas é amplamente utilizada em depósitos de minérios metálicos (Curi, 2017).

A figura 2 apresenta o método de lavra por bancadas, que oferece diversas vantagens conforme elencado por Silva (2008), como a alta produtividade, baixa proporção de estéril em relação ao minério e um processo de desenvolvimento simplificado. Porém, esse método também apresenta algumas desvantagens, tais como a necessidade de um investimento inicial elevado e a demanda por áreas extensas para operação, o que aumenta a área de recuperação e reabilitação ambiental necessária.

**Figura 2** - Lavra de minério de ferro pelo método de bancadas em encosta



**Fonte:** acervo do autor

A técnica de lavra por bancadas apresenta alguns aspectos importantes, como a altura das bancadas e os ângulos dos taludes, que podem ser aplicados tanto em cavas quanto em encostas.

A altura das bancadas refere-se à distância entre as cristas da cava e pode variar de acordo com a demanda de produção, dimensões do corpo mineral e tipos de equipamento utilizados na operação.

Por sua vez, o ângulo dos taludes é responsável pela forma final da cava e afeta diretamente a relação entre o minério e o estéril, medido a partir do plano horizontal. Esse ângulo é influenciado pelo conjunto de acessos da mina.

É importante projetar a largura mínima, a altura e o ângulo máximo das bancadas com base nas condições geotécnicas, serviços a serem executados e equipamentos a serem utilizados, visando garantir a segurança dos trabalhadores (DNPM, 2001)

## **2.4 Infraestrutura de mina**

Os serviços de infraestrutura de uma mina englobam uma série de atividades que fornecem suporte essencial às operações de lavra, tais como a remoção da cobertura vegetal, construção de rampas e vias de acesso, sinalização da mina, entre outras. Essas atividades precisam ser cuidadosamente planejadas, supervisionadas e executadas de

acordo com as necessidades do projeto e do avanço da mina. Problemas em qualquer uma dessas atividades pode afetar diretamente a produção da empresa e até mesmo paralisar as operações de lavra (ANDRADE, 2014).

A pronta infraestrutura de mina é fundamental para garantir o sincronismo e o sucesso operacional de todas as atividades de mineração, oferecendo suporte estrutural crucial. Quaisquer falhas em suas operações podem prejudicar o ritmo de produção e causar depreciação ou perda de equipamentos. Embora haja pouca literatura sobre o assunto, é inegável a importância da infraestrutura de mina para a eficiência e rentabilidade da mineração (ANDRADE, 2014).

#### **2.4. Planejamento de lavra**

O planejamento é etapa importante na mineração, pois define estratégia de operação para otimização global do processo dos quais podemos destacar: redução de custos, qualidade das matérias-primas, maior confiabilidade, questões ambientais, entre outros (SILVA, 2022). Em outras palavras, é a habilidade de criar um plano que maximize a utilização do recurso encontrado, utilizando informações obtidas por meio da pesquisa mineral, tais como a localização, formato e teor do depósito de minério. O planejamento da extração normalmente envolve três etapas distintas. Inicialmente, há o estudo conceitual, onde as ideias estão em estágio inicial e são esboçados modelos de trabalho preliminares. A segunda etapa é o estudo preliminar, que avalia principalmente a atratividade do projeto e justifica o investimento necessário. Por fim, temos o estudo de viabilidade técnica, que considera aspectos legais, ambientais e comerciais do empreendimento. Após completar todas as etapas e confirmar a viabilidade da extração, inicia-se a implementação da mina (MARIZ, 2018).

A atividade de planejamento de minas envolve a gestão estratégica e técnica dos negócios relacionados à exploração de recursos naturais. A convergência dessa prática foi impulsionada pelo avanço da tecnologia da informação, especialmente nas otimizações relacionadas ao formato do depósito e à determinação do teor de corte (BAZANTE, 2004).

O planejamento de lavra compreende o desenvolvimento de um plano abrangente para a mina, considerando os recursos necessários e os custos envolvidos nesse processo. É importante ressaltar que esse planejamento é dinâmico, pois à medida que a mina é explorada, novas informações são adquiridas e precisam ser constantemente incorporadas ao plano original, levando em conta as novas condições da mina.

O planejamento é um guia que estabelece as operações a serem realizadas na mina, desde a mobilização e instalação até a conclusão da extração. O fim da extração mineral não significa necessariamente o esgotamento completo do recurso, mas sim a retirada do minério economicamente viável em sua totalidade. O objetivo do planejamento é fornecer suporte para atender às necessidades da mina com antecedência, identificar futuros problemas que possam surgir e desenvolver medidas preventivas, garantindo um fluxo eficiente de operações.

O planejamento da mina segue um roteiro detalhado de operações. A planificação da área de extração é dividida em três tipos, cada um com uma finalidade específica: planejamento de curto prazo, médio prazo e longo prazo (LOPES, 2012). Isso significa que o planejamento da mina pode ser subdividido em três categorias, com base no critério de tempo: curto prazo, médio prazo e longo prazo.

**Planejamento de curto prazo:** caracteriza-se por ser o mais imediatista dentre os tipos de planejamento. Ele segue as diretrizes estabelecidas nos planejamentos de médio e longo prazo em relação aos critérios de extração, porém precisa lidar com as demandas diárias, semanais e mensais. Neste modelo de estratégia, as oscilações nos valores das matérias-primas exercem uma influência mais significativa sobre os gastos, pois não há uma dispersão gradual ao longo do período devido à sua brevidade (PINTO; DUTRA, 2008).

O foco principal do planejamento de curto prazo é determinar as áreas de extração e os desenvolvimentos imediatos, geralmente em um período menor que um ano, podendo ser estendido de acordo com a vida útil estimada do empreendimento. Seus principais objetivos são o controle da qualidade do material extraído, o controle de custos e a maximização da produção.

A fase de preparação que antecede qualquer atividade na mina é conhecida como o plano de curto prazo. Seu objetivo é estabelecer as condições necessárias para a realização das tarefas programadas relacionadas às etapas de produção. Dentro do plano de curto prazo, destacam-se atividades como a criação de acessos ao depósito mineral, como estradas e rampas. Além disso, inclui-se a definição do local para disposição do material estéril e a identificação das áreas iniciais de operação das escavadeiras.

Comumente, nas minas com método de lavra convencional (ou não rígido), a solução para este problema tende a ser a correção da qualidade na mina, posicionando

as frentes de lavra em locais com minério de melhor qualidade (Rezende, 2023).

A finalidade principal do planejamento a curto prazo é antecipar e prever as necessidades das etapas subsequentes do processo, garantindo assim um fluxo contínuo e eficiente de operações.

**Planejamento de médio prazo:** é o tipo de planejamento que considera os aspectos imediatos da extração mineral, porém os relaciona com os planos de longo prazo. Esse planejamento abrange um período maior do que o de curto prazo, mas menor do que o de longo prazo. No planejamento de médio prazo, é prevista uma margem de erro, que deve ser ajustada durante o planejamento de curto prazo (PINTO; DUTRA, 2008).

O planejamento de médio prazo destaca as mudanças que a mina passará ao longo de sua vida, permitindo a adequação do dimensionamento dos equipamentos e, conseqüentemente, dos investimentos e custos operacionais. Geralmente, estabelece-se um período de cinco anos como adequado, considerando a vida útil do empreendimento (PINTO; DUTRA, 2008). O objetivo principal do planejamento de médio prazo, também conhecido como planejamento tático, é atender demandas específicas da empresa, buscando sempre a máxima eficiência dos recursos disponíveis e visando maximizar o valor presente líquido. Ao contrário do planejamento estratégico, o planejamento de médio prazo leva em consideração a vida útil dos equipamentos (PINTO; DUTRA, 2008).

O período de planejamento de médio prazo varia de um a cinco anos, dependendo do empreendimento, e tem como objetivo garantir uma continuidade sustentável da extração mineral, levando em conta critérios de produtividade e viabilidade operacional (PINTO; DUTRA, 2008).

**Planejamento de longo prazo:** é responsável por definir a estratégia de extração e operação da mina até sua exaustão, abrangendo toda a vida útil do empreendimento. Esse tipo de planejamento é mais suscetível às variações de preços de mercado, pois se estende por um período temporal muito mais longo. Seu objetivo é proporcionar um retorno financeiro aos investidores com o mínimo de risco possível, ao mesmo tempo em que maximiza a vida útil do empreendimento, evitando uma extração excessiva (PINTO; DUTRA, 2008).

No planejamento de longo prazo, ocorre o primeiro sequenciamento da reserva, com estimativas de volumes, produção, teor médio do minério, entre outros. Também é

nessa etapa que são definidos os limites geométricos da cava e realizados estudos de localização de infraestruturas permanentes, bem como os acessos necessários. O planejamento estratégico de lavra, também conhecido como planejamento de longo prazo, consiste no processo de determinar o projeto e sequenciamento de extração mais adequados, com base em uma estratégia pré-estabelecida (SILVA, 2008).

Esse planejamento abrange todo o período de vida útil do empreendimento e deve ser constantemente reavaliado à medida que a cava avança e novos parâmetros surgem ou são modificados. Esses parâmetros estão relacionados a questões mineralógicas, operacionais, legais e ambientais, uma vez que a extração está sujeita a restrições e regulamentações nessas áreas.

Dessa forma, é essencial estabelecer uma conexão entre os planejamentos de curto, médio e longo prazo, pois qualquer alteração em um deles afetará os demais. As estratégias adotadas e as premissas do projeto também devem convergir de maneira coerente. Um aspecto crucial, que não pode ser negligenciado, é a inclusão dos custos e o planejamento para o encerramento da mina, o qual abrange a recuperação da área degradada pela atividade de mineração.

Portanto, no setor de mineração, o planejamento mineiro deve considerar todas as etapas necessárias para assegurar a viabilidade do empreendimento e o funcionamento sistemático, buscando constantemente otimizar os processos.

O planejamento mineiro deve estar preparado para se adaptar às mudanças no contexto ambiental, acompanhando atualizações das normas ambientais e as necessidades que surgem ao longo da vida útil do empreendimento. Aspectos como avanços tecnológicos, flutuações na economia global, incluindo os preços dos minérios, disponibilidade de mão de obra, políticas governamentais, concorrência e a descoberta ou disponibilidade de novas matérias-primas são alguns dos elementos que devem ser constantemente considerados (SILVEIRA, 2021).

É por esses motivos e outros que o planejamento mineiro depende significativamente da experiência e conhecimento dos profissionais envolvidos, pois não se trata de um processo estático. À medida que a mina avança, novos dados e informações emergem, muitas vezes desconhecidos durante a fase de pesquisa mineral, exigindo ajustes nas operações e modificações no sequenciamento.

A saúde do empreendimento mineiro requer previsibilidade das operações, com foco na segurança, na busca por alternativas para redução de custos sem comprometer os processos e na minimização ou prevenção de impactos ambientais decorrentes da

extração. Essa previsibilidade possibilita a implementação de medidas corretivas com antecedência suficiente para evitar comprometimentos na produção.

O planejamento da lavra é uma ciência em constante evolução e aprimoramento, impulsionada pelas inovações científicas e tecnológicas que surgem diariamente no setor.

### **3 METODOLOGIA**

O estudo deste TCC compreendeu três etapas que buscam ressaltar a importância da infraestrutura de mina na etapa de planejamento de mina, desde os dados do mapeamento geológico, até à sua viabilidade econômica. A primeira etapa consistiu em efetuar um levantamento literário sobre o tema, demonstrando a necessidade da infraestrutura de mina para o êxito operacional das atividades que dela demandam e os possíveis impactos. Para isso, utilizou-se como princípio fundamental de pesquisa a infraestrutura de mina utilizada para a lavra em bancadas na empresa CSN Mineração. Na segunda etapa foi abordada as principais características do projeto de análise associados à infraestrutura de mina, a saber, localização, método de lavra e operações unitárias de lavra. Por fim, na terceira parte realizou-se um estudo utilizando a ferramenta FPC (Programa de Produção e Análise de Custos de Frota), na frota de caminhões fora de estrada com capacidade de 240 toneladas em parceria com a empresa Sotreq em trajetos provenientes das frentes de lavra para analisar a parâmetros como: produtividade, velocidade média dos caminhões, a distância média de transporte (DMT), e tempos de carregamentos e descargas.

#### **3.1 Características do projeto de análise**

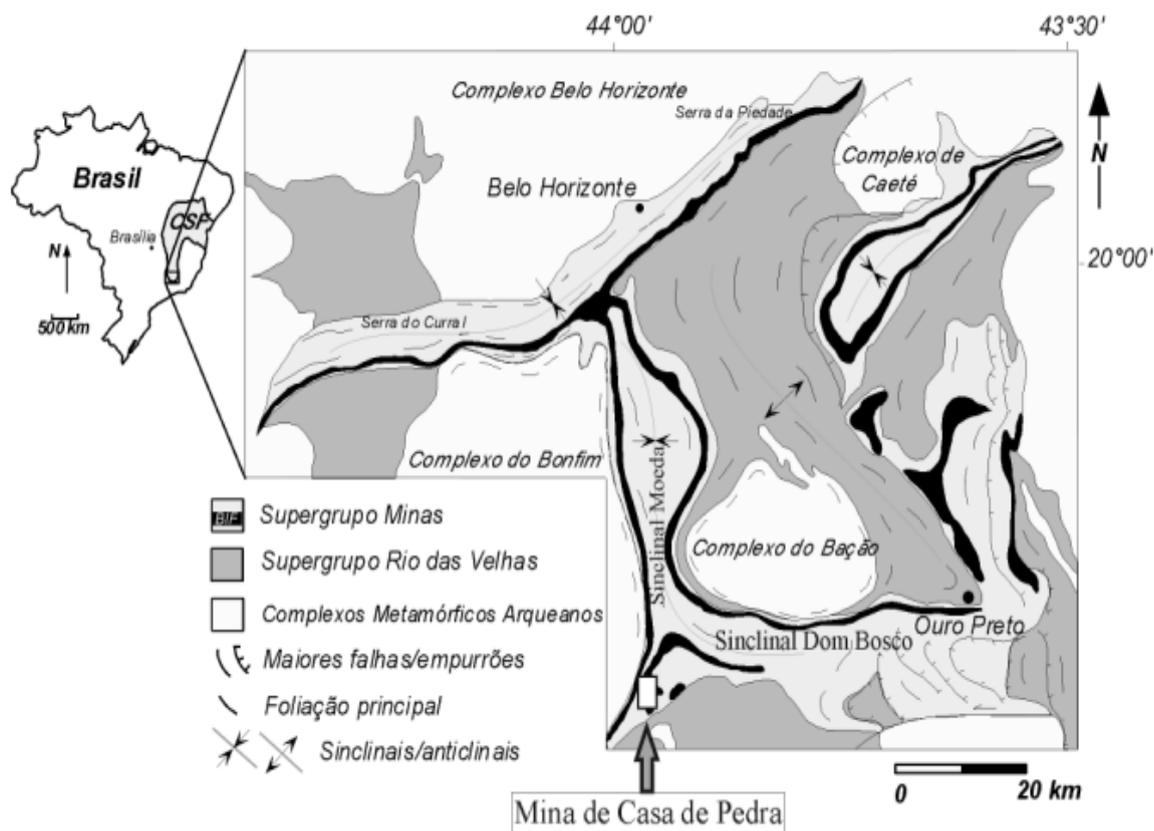
##### **3.1.1 Localização**

A Mina de Casa de Pedra está situada na parte sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (Fig. 1), a uma distância de aproximadamente 8 km da cidade de Congonhas do Campo. No contexto geológico, a jazida encontra-se numa área de grande complexidade estrutural, influenciada pela Sinclinal de Dom Bosco, com orientação geral leste-oeste, e pela Sinclinal da Moeda, cujo eixo principal segue aproximadamente o sentido norte-sul (Fig. 2).

Na Mina de Casa de Pedra, a geração de coleta ocorre em dois corpos supergênicos chamados Corpo Oeste e Corpo Principal, que estão alojados na Formação Ferrífera Bandada Cauê, pertencente ao Supergrupo Minas, com uma idade paleoproterozoica. A mina é de propriedade da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e

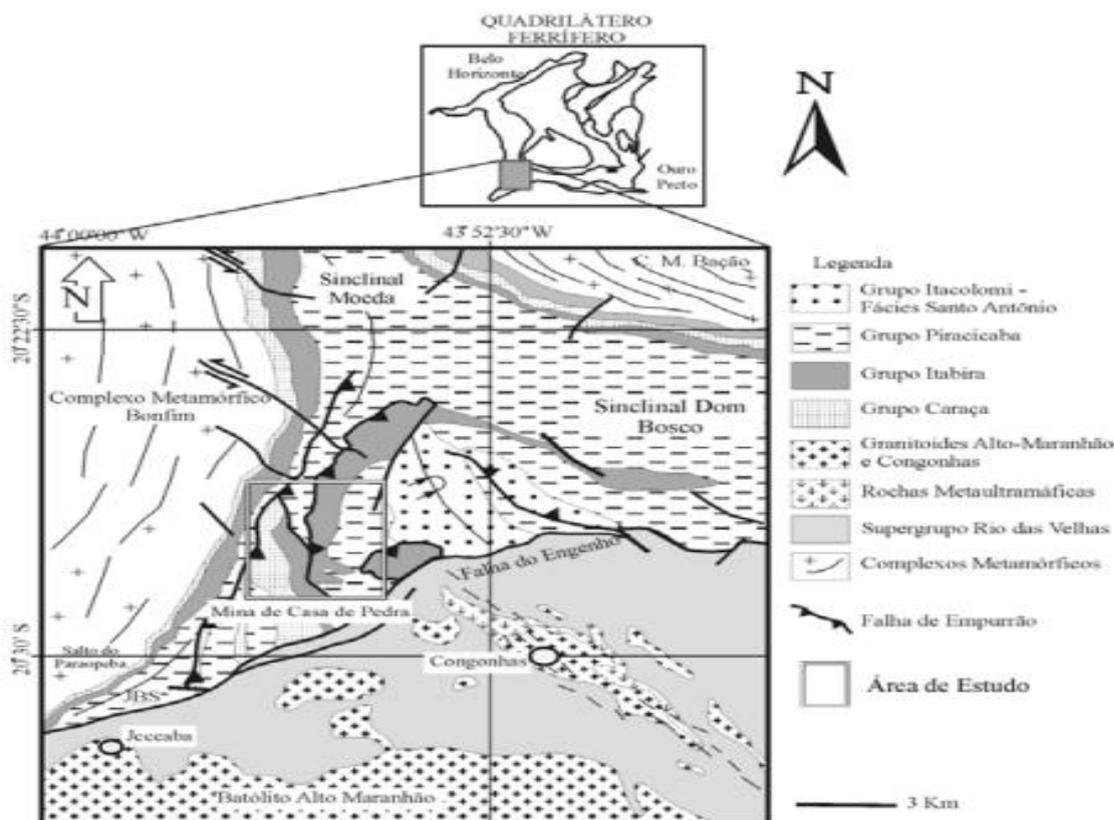
tem sido responsável pela produção de minério de ferro desde 1946, com o objetivo de abastecer a Usina Presidente Vargas, localizada em Volta Redonda, RJ (TRZASKOS, 2011).

**Figura 3** - Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero, mostrando a localização da área de estudo (extraído de Lagoeiro 2000, modificado de Dorr 1969)



**Fonte:** extraído de Endo 1997, modificado de Dorr (1969).

**Figura 4** - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero com a localização da área de estudo.



Fonte: extraído de Endo 1997, modificado de Dorr (1969).

### 3.1.2 Método de lavra

Na CSN, o método utilizado é o de lavra por bancadas ou bancos, em que o capeamento estéril é removido e transportado para um depósito próximo à abertura, a fim de expor o minério e permitir o acesso a ele. Esse processo é chamado decapeamento. Tanto o decapeamento quanto a própria gestão do processamento são realizados em uma ou mais bancadas em sequência. Nesse método de lavra, o desenvolvimento ocorre sempre de cima para baixo, por meio de uma série de bancadas consecutivas.

O desenvolvimento começa a enfrentar a bancada localizada em uma cota mais elevada, após o trabalho inicial de preparação do terreno. Essa preparação inicial geralmente envolve desmatamento, construção de estradas iniciais para acesso ao local e remoção e armazenamento do solo para uso futuro. Após o desenvolvimento adequado da primeira bancada, passa-se sucessivamente para a segunda, terceira, quarta e assim por diante, até chegar à última bancada (CURI, 2017).

A partir da exposição do minério, as operações unitárias de controle podem ser coordenadas para garantir que a receita executada com a venda do minério seja, no mínimo, suficiente para cobrir os custos de remoção do estéril e, ao mesmo tempo, atingir gradualmente os objetivos de longo prazo do projeto em relação à cava final.

Além disso, o desenvolvimento da lavra por múltiplas bancadas também resulta em uma maior extensão de minério livre exposto, o que favorece a mistura de minérios distintos, tornando a produção mais previsível, mantida e contínua.

A técnica de lavra por bancadas envolve o transporte de grandes quantidades de estéril e minério para fora da cava, por distâncias relativamente longas, por meio de estradas inclinadas. É importante determinar as distâncias médias de transporte ao longo da vida útil da mina, pois esses valores foram significativamente o projeto da cava, a seleção e dimensionamento dos equipamentos e taxa de produção. Em muitos casos de *commodities* minerais com teores de baixos de minério, é necessário manter uma alta produtividade dos equipamentos para compensar os custos. Para evitar longas distâncias de transporte e estradas muito íngremes, a profundidade da cava não deve ser excessiva.

No desenvolvimento da lavra por bancadas, é necessário definir a localização de pilhas de estéril, oficinas, escritórios, depósitos temporários de abastecimento e outras instalações fora dos limites da cava final projetada, por questões de economia. A localização da pilha de estéril e a reconstituição e reabilitação da área de lavra e seus arredores, incluindo o armazenamento e conservação do solo removido, são particularmente importantes na lavra a céu aberto. Os equipamentos são selecionados e adquiridos de acordo com as necessidades para o início do decapeamento, permitindo a exploração do minério conforme planejado. A remoção do estéril e do minério continua de acordo com uma relação de cuidados, considerando os projetos de curto, médio e longo prazos. O projeto e a manutenção das estradas são cruciais em lavras a céu aberto, pois propiciam acesso aos bancos de minério desmontado, ao manuseio do minério, às pilhas de estéril e às áreas de serviço.

A figura 5 demonstra a cava da Mina Casa de Pedra, onde percebe-se a transição de lavra em encosta para lavra em cava.

**Figura 5** - Lavra por bancadas - Mina Casa de Pedra



Fonte: acervo do autor

### 3.1.3 Operações unitárias de lavra

Na exploração de minérios, carvão ou rochas industriais usando lavra em bancadas, é importante que os ciclos de operação e os equipamentos sejam o mais eficientes possíveis, tanto na remoção do material inútil quanto na movimentação do minério. O fator determinante é a diferença ou semelhança entre a composição do minério e do material inútil. Se os materiais do minério e do material inútil tiverem uma composição semelhante, isso será aprovado, pois permitirá o uso dos mesmos equipamentos. Além disso, uma eventual substituição dos equipamentos, em caso de quebras ou necessidades de produção imprevistas, poderá ser mais fácil.

O ciclo das operações de mineração convencional, com as principais variáveis operacionais de cada uma delas, é apresentado a seguir.

- Perfuração (diâmetro dos furos, espaçamento entre os furos, uso de tampões etc.): utilizam-se perfuradoras rotativas do tipo *roller bit* (para rochas macias ou de média dureza), perfuradoras de percussão ou rotativas percussivas (para rochas duras) e perfuradoras do tipo *Jet piercing* (utilizando chama, jato de água, jato de plasma, ultrassom ou vibração) para rochas duras com composição silicosa. Na maioria das grandes minas a céu aberto no Brasil, o diâmetro máximo de perfuração é de 10 polegadas, sendo predominantemente utilizado o diâmetro de 9 7/8 polegadas.

Em minas a céu aberto de grande porte no Canadá, Austrália e Estados Unidos, já são adotados diâmetros de até 15 polegadas (Curi,2017).

- Detonação (quantidade de explosivo por furo, taxa de carregamento, plano de detonação): utiliza-se ANFO ou emulsões explosivas; alternativamente, rochas friáveis ou macias, como o carvão mineral, podem ser escavadas diretamente, sem o uso de explosivos. Os processos de carregamento dos explosivos e sua detonação são semelhantes aos utilizados na remoção do material inútil. O uso de emulsões explosivas, através de caminhões especializados para o carregamento mecanizado dos furos, já é uma prática comum em grandes minas a céu aberto no Brasil. Essas emulsões são preparadas de forma específica, de acordo com as densidades necessárias, para detonar os diferentes tipos de material a serem desmontados.
- Escavação e carregamento (capacidade, fator de enchimento, produtividade, etc.): são utilizadas escavadeiras elétricas, escavadeiras hidráulicas, escavadeiras a cabo, escavadeiras de arrasto, carregadeiras sobre pneus, retroescavadeiras, carregadeiras frontais, *draglines* e *scrapers* (para minérios argilosos).
- Transporte: os materiais são transportados por caminhões, caminhões fora de estrada, correias transportadoras e ferrovias.
- Içamento (em cavas muito profundas e terrenos inclinados): são usadas correias transportadoras de alta inclinação, *skips* e minerodutos.

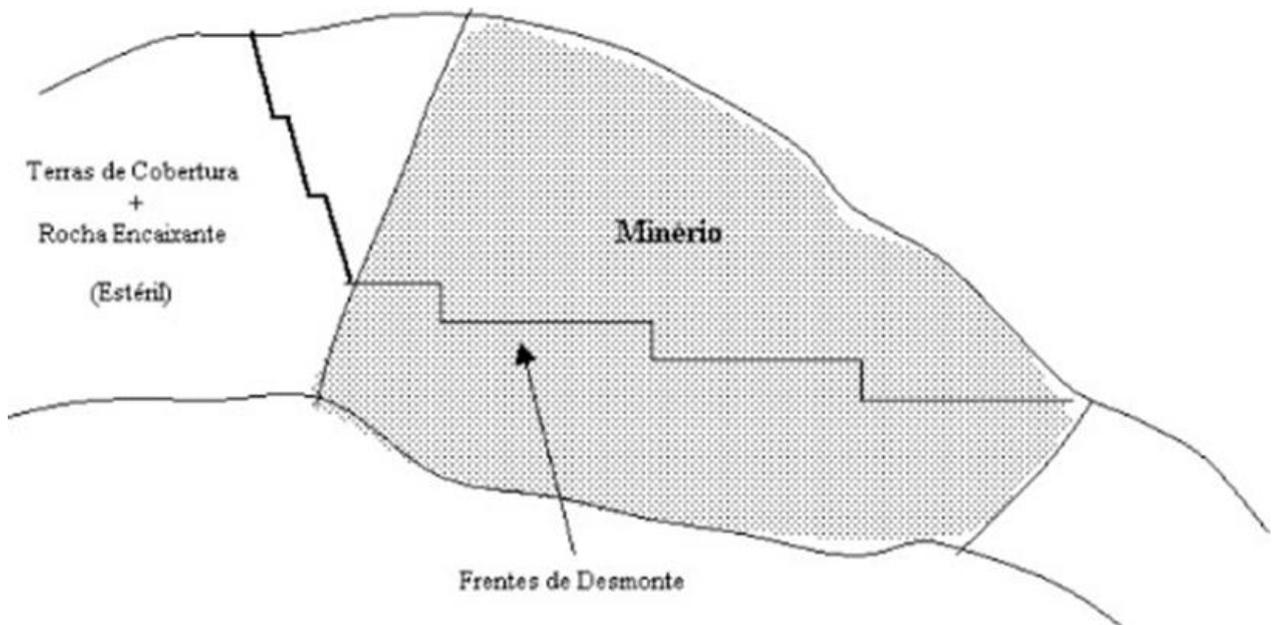
As operações são muito semelhantes, seja na remoção do material inútil ou na consistência do determinado. O "run of mine" (ROM) refere-se ao "resultado das operações mineiras", ou seja, ao material resultante da aplicação do ciclo das operações mineiras (perfuração, detonação, escavação, carregamento e transporte). É o minério bruto, preparado diretamente do local de visitas. O ROM representa o minério bruto, antes do início do processo de beneficiamento. No tipo de beneficiamento mais comum, a operação de beneficiamento do ROM ocorre para separar e processar o processamento em produtos finais de maior valor (CURI, 2017).

No método de lavra em bancadas, pode-se realizar a mineração em encostas ou

em cavas (figuras 6 e 7). Uma vantagem da mineração em encostas é o escoamento natural da água, ou seja, a drenagem ocorre naturalmente. Por outro lado, na mineração em cavas, a área de garantia fica abaixo da topografia original, o que geralmente requer o uso de bombas para drenar a água e esgotá-la.

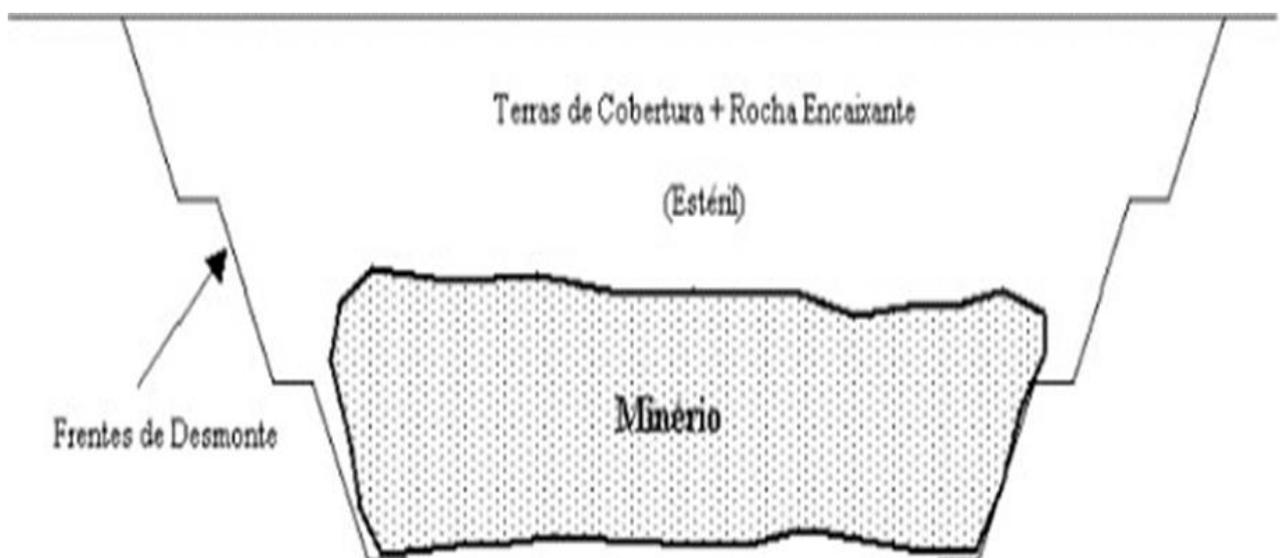
A escolha entre as duas técnicas depende basicamente da topografia local, ou seja, a localização do corpo do minério.

**Figura 6 – Lavra em encosta**



Fonte: FERREIRA (2013).

**Figura 7 – Lavra em cava.**

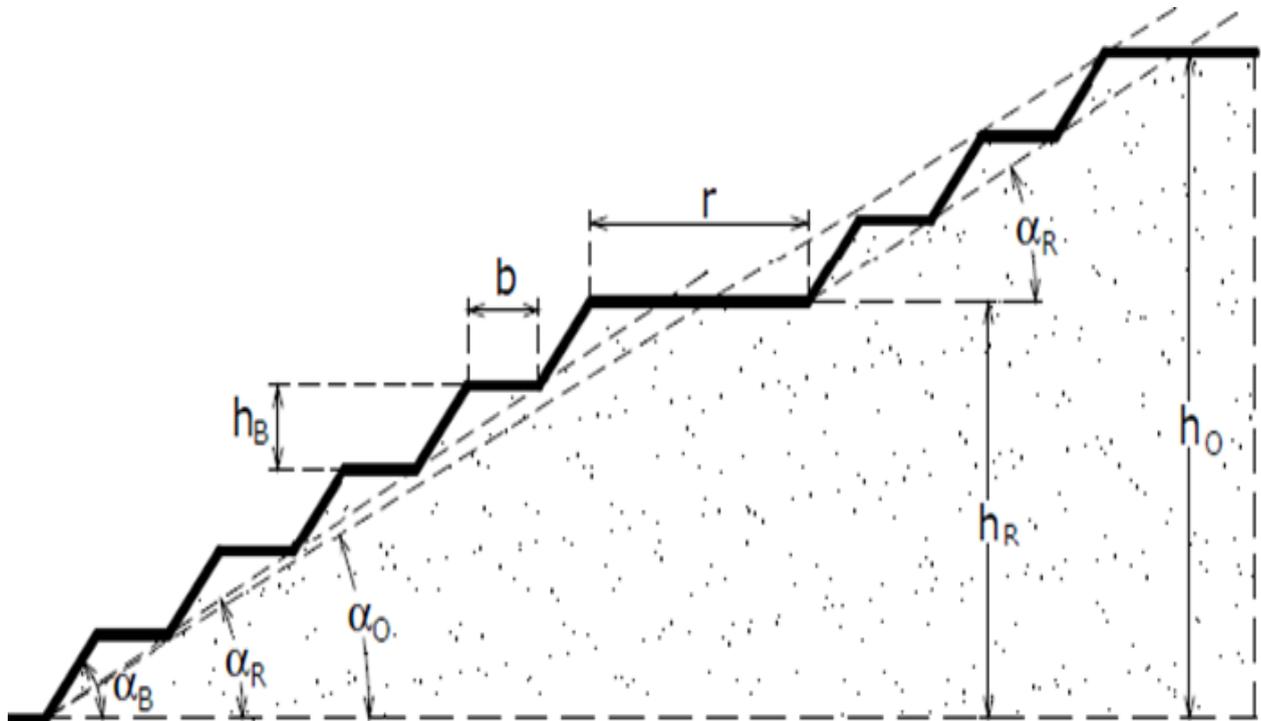


Fonte: FERREIRA (2013).

### 3.1.4 Parâmetros da lavra por bancadas

De acordo com FERREIRA (2013), o declive da área de garantia é um elemento de extrema importância, não apenas devido ao seu impacto na segurança das operações, mas também por determinar os limites de uma cava. A Figura 8 apresenta os principais parâmetros de um método de atendimento em bancadas.

Figura 8 - Parâmetros de um talude.



Fonte: FERREIRA (2013).

Considerando:

$\alpha_R$ = Ângulo de inter-rampa

$\alpha_O$ = Ângulo global da cava

$h_R$ = Altura máxima da inter-rampa

$r$ = largura da rampa

$h_O$ = Altura máxima da cava/encosta

$h_B$ = Altura da bancada

$b$ = Largura da bancada

$\alpha_B$ = Ângulo do talude

No dimensionamento da altura das bancadas, diversos fatores são considerados, como o tamanho dos equipamentos de escavação e carregamento, as características do

maciço rochoso e o tipo de desmonte a ser realizado. Já a largura da bancada leva em conta as dimensões dos equipamentos utilizados para a remoção e carregamento do material desmontado. De acordo com CURI (2014), ao comparar diferentes larguras de bancada, é observado que o uso de larguras maiores traz vantagens, como menor tempo de manobra, melhor supervisão, maior eficiência, produtividade e taxa de produção. Por outro lado, apresenta proteção, como menor seletividade e maior diluição do minério. Além das bancadas ou bermas de segurança, também são utilizadas pilhas de material de proteção para aumentar a segurança das operações.

É importante destacar que o ângulo do talude deve permitir a continuidade das operações que ocorrem no mesmo nível e em níveis superiores e inferiores. Além disso, o volume de material inútil produzido está diretamente relacionado ao ângulo de inclinação das escavações. Em outras palavras, quanto maior o ângulo do talude, menor será a quantidade de material inútil a ser removido, gerado em uma relação menor entre material inútil e ferro, o que leva a uma redução nos custos operacionais devido à menor quantidade de material a ser removido.

Por fim, as estradas são os caminhos utilizados para acesso, transporte e prestação de serviços na área de mineração. A figura 9 demonstra a conformação da estrada realizada por um trator de esteira na Mina Casa de Pedra na Csn Mineração.

**Figura 9:** Manutenção de Berma.



Fonte: Acervo do autor

## **4 PARÂMETROS A SEREM ANALISADOS NA CONSTRUÇÃO DOS ACESSOS**

Durante muito tempo, as estradas de mineração receberam pouca atenção em relação ao sucesso da atividade mineradora. No entanto, atualmente, há um crescente reconhecimento de sua importância como facilitadoras de uma das etapas fundamentais da mineração: o transporte. Uma estrada em boas condições de operação resulta em maior segurança e produtividade para a frota de veículos utilizados (REIS, 2014).

Compreender, pois, a importância de tais estradas é essencial para otimizar as operações de mineração.

Os especialistas BRANDÃO e TOMI (2011), responsáveis pela criação da Metodologia de Estimativa e Gestão de Produtividade de Minas (MEGPM), destacam que a gestão da produtividade desempenhou um papel crucial na redução imediata dos custos operacionais em uma mina. Ao aplicar essa metodologia em uma mina a céu aberto de grande porte, orientada na logística de recebimento de ferro, constatou-se que grande parte das ações conduzidas para o aumento da produtividade se concentrou na gestão da velocidade dos caminhões devido a grande perda gerada na produção e alta variação. Uma das causas das perdas de velocidade são os projetos e as condições de manutenção inadequada das vias de transporte na mina.

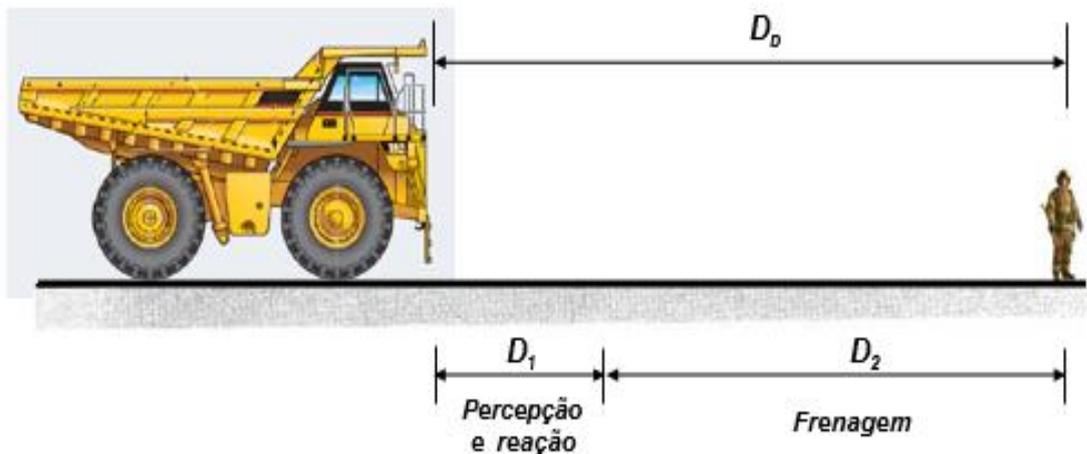
Para garantir que as vias de acesso em uma mina estejam em boas condições, é estabelecer um padrão para projetos, operação e manutenção. Para criar esses padrões, é necessário conhecer as normas regulamentadoras que definem os requisitos a serem seguidos. Uma das normas relevantes nesse contexto é a NR22 (BRASIL, 2016), que aborda diversos aspectos relacionados à circulação e ao transporte de pessoas e materiais na indústria da mineração. De acordo com a NR22, toda mina deve contar com um plano de trânsito que estabelece regras de preferência de movimentação e distâncias mínimas entre máquinas, equipamentos e veículos, levando em consideração a segurança e as velocidades permitidas, de acordo com as condições das vias de trânsito rolamento. A aplicação dessas normas contribui para um ambiente de trabalho mais seguro e eficiente na mineração.

### **4.1 Distância de segmento**

A distância de segmento refere-se à distância mínima que deve ser mantida durante o tráfego nas vias de acesso, entre um equipamento e outro equipamento ou veículo rodoviário. Essa distância é determinada levando em consideração todo o espaço percorrido por um equipamento em uma estrada, na velocidade de projeto, desde o

momento em que se percebe a presença de um obstáculo até a parada completa do equipamento. A distância de parada ( $D_p$ ) é composta pela soma de duas partes: a distância de percepção e reação ( $D_1$ ) e a distância de frenagem ( $D_2$ ) (Figura 16). O tempo de recepção e reação do operador do caminhão geralmente é de 2,0 segundos, e o tempo de reação de frenagem varia de acordo com o peso e a velocidade do equipamento. Esses fatores são importantes para garantir a segurança e prevenir colisões entre os veículos.

**Figura 10** - Distância de parada.



Fonte: FERREIRA (2013).

## 4.2 Projetos dos acessos de mina

Além disso, um projeto de via de acesso deve considerar a largura mínima necessária para os acessos, a instalação adequada de sinalização e leiras de segurança, bem como o gradiente ou inclinação da via.

### 4.2.1 Largura mínima dos acessos

Conforme estabelecido pela Norma Regulamentadora NR-22 do Ministério do Trabalho e Emprego, é necessário seguir requisitos específicos para garantir a saúde e segurança ocupacional na indústria de mineração. No que diz respeito às vias de trânsito em minas a céu aberto, a norma determina que a largura dessas vias mínimas deve ser duas vezes maior que a largura do maior veículo utilizado em pistas simples, e três vezes maior em pistas duplas.

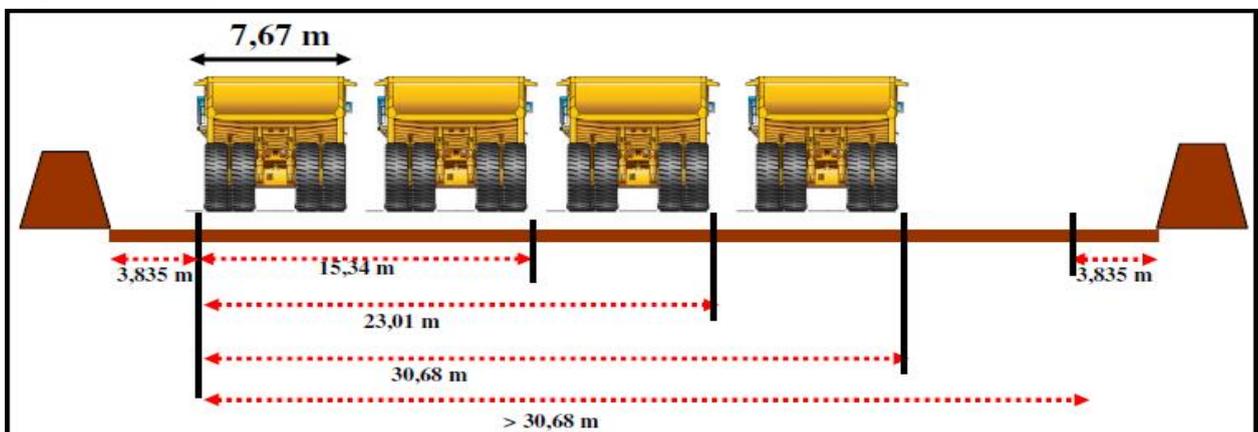
No entanto, em casos em que o plano de lavra ou a natureza das atividades não exigem cumprir essas larguras, devem ser adotados procedimentos adicionais e

sinalização adequada para garantir a segurança do tráfego. Para ilustrar, considerando uma frota de caminhões CAT789, a largura mínima dos acessos em pista simples deve ser de 15,64 metros, o que corresponde a duas vezes a largura desse caminhão (CAT, 2023). Em pistas duplas, a largura mínima exigida é de 23 metros, que é três vezes a largura do caminhão 789. Em trechos com curvas, onde há maior exigência de espaço, a largura mínima necessária é de 30,68 metros, equivalente a quatro vezes a largura do caminhão 789 (Figura 11).

Além disso, sempre que houver risco de queda de equipamentos e veículos nas laterais da pista, é fundamental aplicar leis de segurança. Essas leis são estruturas de proteção que ajudam a evitar acidentes e minimizar danos caso tenham causado algum incidente.

Seguir essas diretrizes protegidas pela NR-22 é de extrema importância para garantir a segurança e o fluxo adequado de veículos nas vias de acesso em operações de mineração a céu aberto.

**Figura 11** – Largura de acesso para caminhões CAT789.



Fonte: Samarco Mineração.

#### **4.2.2 Leiras de segurança**

Conforme estabelecido na Norma Regulamentadora NR-22, é necessário construir leiras nas laterais das bancadas ou estradas onde há riscos de quedas de veículos. Essas leiras devem ter uma altura mínima correspondente à metade do diâmetro do maior pneu do veículo que trafega pela via. É importante encontrar um equilíbrio, pois as leiras muito baixas não cumprem seu papel como barreira física, enquanto as leiras muito altas podem prejudicar a visibilidade do condutor.

Para a construção das leiras, devem ser selecionados materiais adequados com alta resistência e boa capacidade de compactação, que podem ser encontrados na

própria mina, como blocos de material compacto com tamanho inferior a 200 mm. Esses materiais garantem a estabilidade e a eficiência das leiras como barreiras de segurança.

Nos trevos de interseções nos acessos, caso sejam utilizadas leiras, é necessário realizar um acabamento nas bordas com rebaixamento. Isso proporciona uma melhor visibilidade para os condutores, evitando obstruções e aumentando a segurança nas manobras (Figura 18).

Seguir essas orientações da NR-22 é fundamental para garantir a segurança dos veículos que transitam pelas estradas da mina, minimizando os riscos de acidentes e quedas. A construção adequada das leiras, com materiais selecionados e ajustes na visibilidade, contribui para um ambiente de trabalho mais seguro e eficiente.

**Figura 12** - Altura de leira de segurança na mina.



Fonte: Acervo do autor

#### **4.2.3 Inclinação de acesso**

O gradiente de uma rampa de acesso refere-se à sua inclinação vertical em relação à horizontal e é comumente expresso em percentual (Figura 19). É importante que o gradiente seja o mais regular e constante possível, evitando mudanças abruptas em curtos intervalos. Rampas com gradientes irregulares podem causar altos esforços na mudança de transmissão e redução da velocidade dos equipamentos de transporte.

De acordo com as observações de KAUFMAN (1977), muitos operadores de caminhões concluíram que boas condições de operação são encontradas em rampas com inclinação máxima entre 7% e 9%. No entanto, nos Estados Unidos, existem leis e regulamentos que estabelecem que 10% é a inclinação máxima permitida (KAUFMAN,

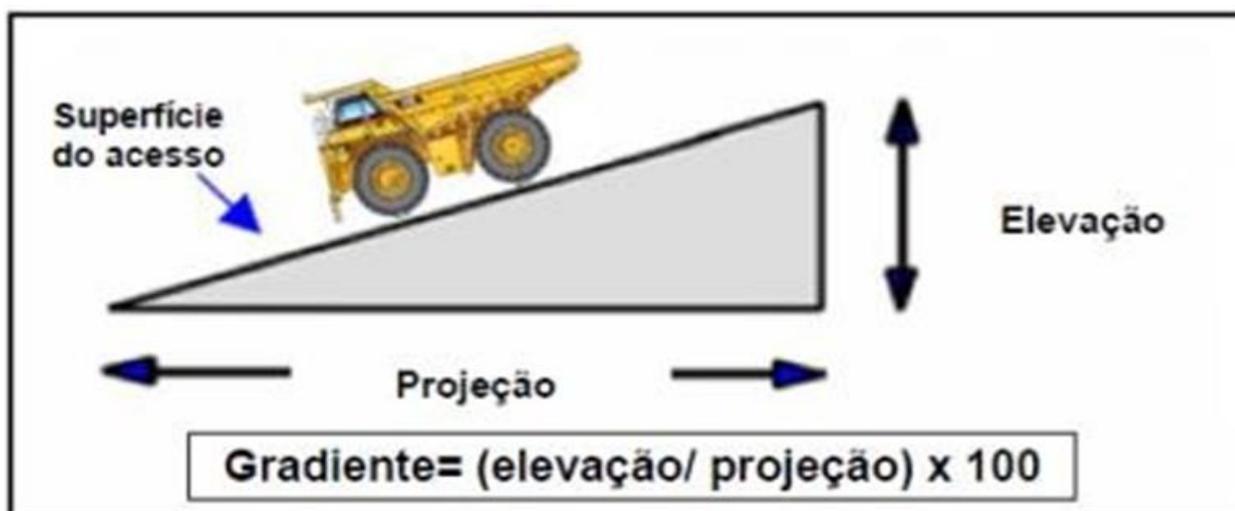
1977).

Esses valores sugerem uma faixa de inclinação ideal para as rampas de acesso, considerando o desempenho dos equipamentos de transporte. É importante seguir as regulamentações reforçadas em cada localidade para garantir a segurança e o cumprimento dos padrões adotados.

Ao projetar as rampas de acesso, deve-se levar em conta essas recomendações, buscando um gradiente que otimize a eficiência da operação e minimize o desgaste dos equipamentos. Rampas com inclinações elevadas podem resultar em dificuldades operacionais, enquanto rampas muito suaves podem comprometer a produtividade.

Portanto, ao definir o gradiente de uma rampa de acesso, é necessário considerar tanto as recomendações de especialistas quanto as regulamentações locais, buscando um equilíbrio entre a eficiência operacional e a segurança dos equipamentos de transporte.

**Figura 13** - Gradiente de acessos.



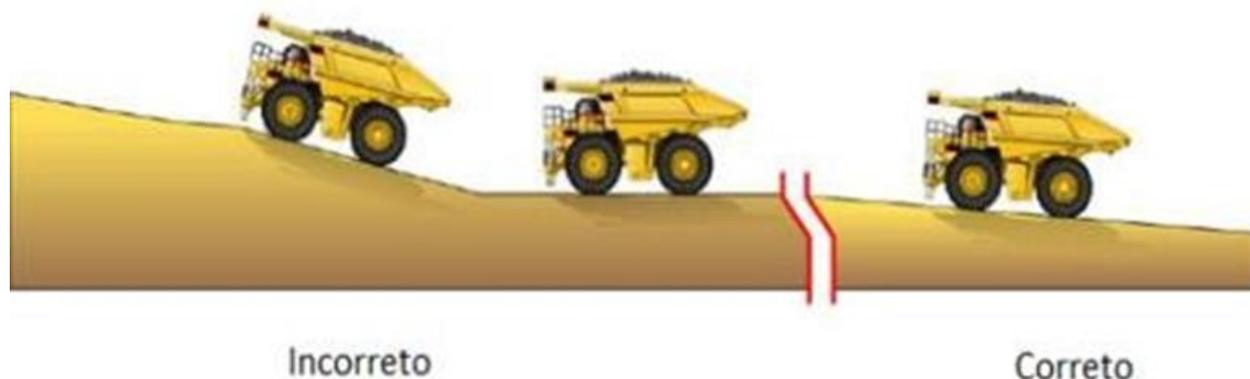
Fonte: Samarco Mineração.

Na figura 14, podem ser observadas duas situações de construção de uma estrada: à esquerda, demonstra um exemplo incorreto, enquanto à direita tem-se um exemplo correto. No caso correto, foi respeitada a construção de um acesso com gradiente inferior a 10% e constante ao longo de toda a sua extensão. Já na situação incorreta, o gradiente não foi o utilizado como na maioria das minas ao redor do mundo devido a uma construção prematura ou falhas na manutenção da estrada. A inclinação de uma estrada e sua conservação são aspectos que devem obedecer aos limites operacionais do fabricante para os equipamentos, sendo ideal que sejam os mais baixos possíveis para evitar gastos

excessivos com combustível, pneus e componentes do sistema de transmissão dos equipamentos (SOUSA JÚNIOR, 2012).

Se não for possível reduzir essa inclinação, é recomendável que na estrada tenha preferencialmente a menor inclinação máxima de maneira que atenda a todos os equipamentos que vão transitar por ela.

**Figura 14** - Inclinação e manutenção da estrada.



Fonte: Adaptado de RICHARDS (2003); SOUSA JÚNIOR (2012).

## **5 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DAS CAMADAS DE ESTRADAS DE MINERAÇÃO**

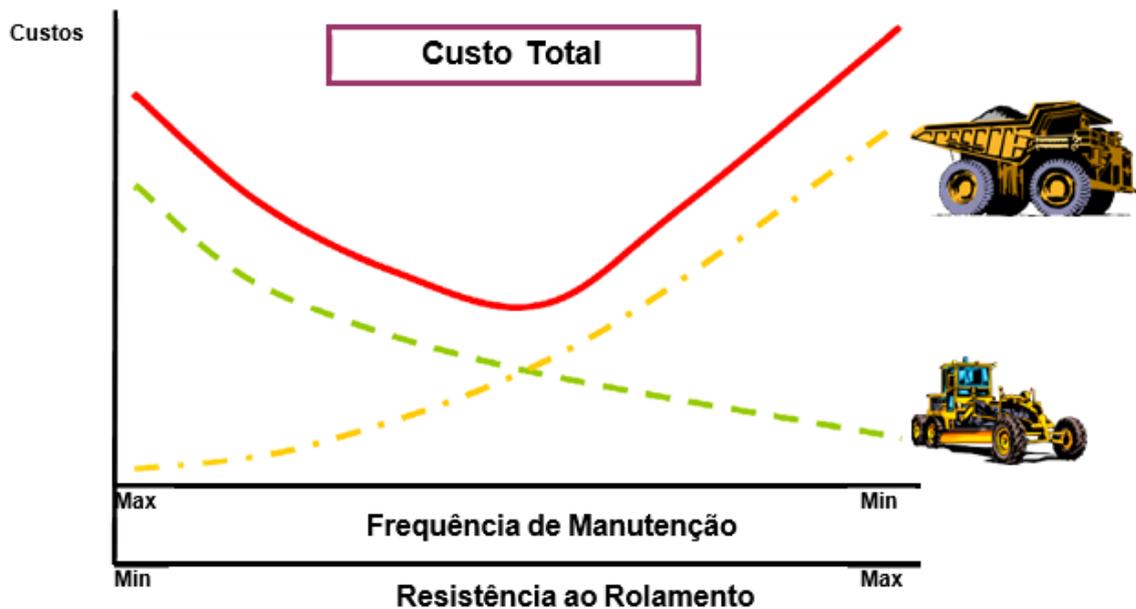
### **5.1 Construção, recuperação e manutenção de praças e pistas de rolamento**

O projeto e construção das estradas de mina seguem critérios específicos relacionados à geometria, estrutura, função e drenagem. Esses critérios são mantidos de acordo com as leis ambientais e normas de saúde e segurança em vigor.

Um sistema eficiente de gestão de estradas requer a análise dos critérios envolvidos em cada etapa, bem como a compreensão da interação entre eles. Isso permite a definição de especificações que visem otimizar o uso das estradas em termos técnicos, de segurança e de redução de custos operacionais. Além disso, é importante desenvolver um sistema de dimensionamento de estradas adequadas para a mineração.

A Figura 15 ilustra que o projeto das estradas de mina deve considerar o equilíbrio entre o custo de construção e manutenção das estradas e o impacto no custo dos equipamentos de transporte. O ponto de cruzamento das duas linhas representa o custo otimizado, ou seja, o melhor custo-benefício para uma determinada operação. Esse ponto indica a solução que proporciona um equilíbrio adequado entre os investimentos necessários e os benefícios obtidos.

**Figura 15** - Curva empírica de custos de estradas de transporte em mineração.

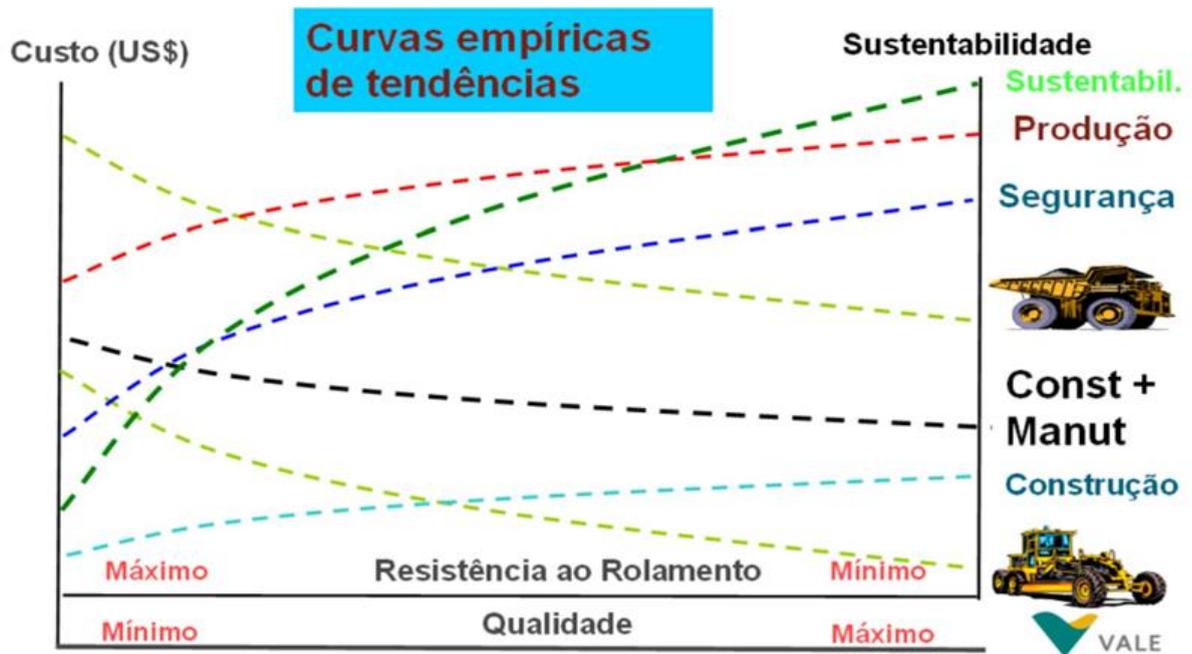


Fonte: Modificado de Thompson e Visser (1999).

A Figura 16 demonstra que a qualidade das estradas de mina tem um impacto significativo na produtividade dos equipamentos de carga e transporte, nos custos de manutenção, na segurança das operações e no ambiente de trabalho como um todo. Além disso, estradas bem projetadas e conservadas podem fornecer condições mais confortáveis e convenientes para os operadores, garantindo a sustentabilidade do empreendimento.

A qualidade das estradas afeta diretamente a eficiência das operações, uma vez que estradas bem construídas e em boas condições de conservação permitem um deslocamento mais suave e rápido dos equipamentos, aumentando a produtividade. ⇨

Figura 16 - Impactos das estradas na mineração.



Fonte: Modificado de Thompson e Visser, 1999.

Na Figura 17, pode-se observar a área operacional do complexo da mina Casa de Pedra, local onde se encontra a maioria das frentes de lavra e acessos, onde foi realizado a pesquisa utilizando a ferramenta FPC.

**Figura 17** - Imagem da área operacional com a locação de acessos.



Fonte: CSN Mineração.

## **5.2 Tipos de projetos de estradas de mina**

A obtenção de um profundo entendimento da geologia local é de extrema importância no processo de construção de uma rodovia, uma vez que o material a ser utilizado na construção é preferencialmente encontrado nas proximidades, como na própria pedreira, a fim de minimizar os gastos envolvidos. Além disso, a avaliação dos impactos ambientais contribui um papel fundamental, visto que a identificação destes é essencial para a implementação de um sistema de gerenciamento ambiental eficaz. Aspectos adicionais a serem considerados na construção da rodovia incluem a drenagem superficial, bem como as características construtivas, tais como o aspecto geométrico, estrutural e funcional.

### **5.2.1 Projeto Geométrico**

Conforme Pontes Filho (1998), o projeto geométrico de uma estrada envolve a relação entre os aspectos físicos da via e os parâmetros operacionais, como frenagem, interferência e características de operação. No contexto das estradas de mina, o projeto geométrico deve priorizar a segurança dos equipamentos que circulam pela via e também buscar condições que otimizem o desempenho dos veículos, resistência ou desgaste de

pneus, chassis, motor, transmissão e outros componentes mecânicos. O aumento constante nas dimensões dos caminhões, especialmente os fora-de-estrada, tem um impacto direto nos parâmetros de projeto geométrico.

Em resumo, a geometria de uma estrada de mina é composta por elementos horizontais (trechos retos conectados por curvas), ajustados verticais (inclinações retas e curvas), superelevação, distâncias de visibilidade e interseções entre esses elementos geométricos, entre outros. O projeto geométrico busca garantir a fluidez e a segurança do tráfego, considerando as características específicas das operações de mineração.

### **5.2.2 Projeto Estrutural**

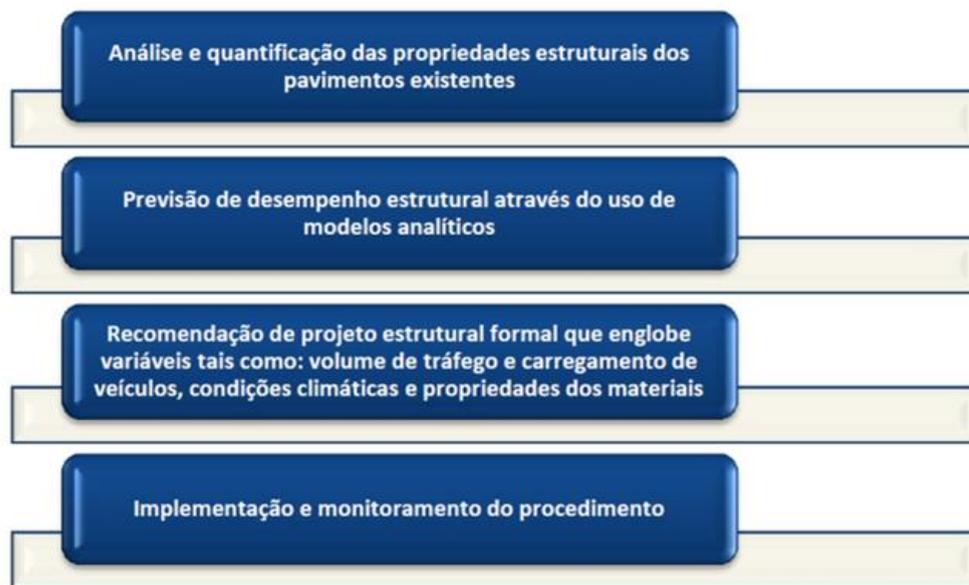
O projeto estrutural de um pavimento tem como principal objetivo o dimensionamento adequado das plantas que o compõem. Esse dimensionamento busca minimizar a necessidade de manutenção excessiva, conforme destacado por Hugo (2005). Os pavimentos devem possuir capacidade de suporte e espessura que atendam aos seguintes critérios:

- resistência à ruptura;
- ausência de deformações ou desgastes excessivos sob os esforços de carga gerados pelo tráfego dos equipamentos;
- capacidade de absorver as cargas externas a elas sem ocasionar deformações no subleito do terreno abaixo.

Em estradas de mina, é fundamental que os materiais disponíveis na própria mina ou nas proximidades possam ser utilizados na construção das camadas do pavimento. Neto (2004) acrescenta que um dos objetivos do dimensionamento do pavimento é a compatibilização dos materiais que compõem as camadas, de forma a garantir que a vida útil do pavimento corresponda a um número projetado de emissão de carga.

Thompson (1996) ressalta que o projeto estrutural consiste em determinar a configuração mais econômica das camadas do pavimento (considerando espessura e tipos de materiais disponíveis), levando em consideração o material existente no local e o volume de tráfego projetado durante a vida útil das estradas. O citado autor divide as atividades do projeto estrutural em etapas distintas, conforme ilustrado na Figura 18.

**Figura 18** - Etapas do dimensionamento das camadas do pavimento das estradas mineiras.

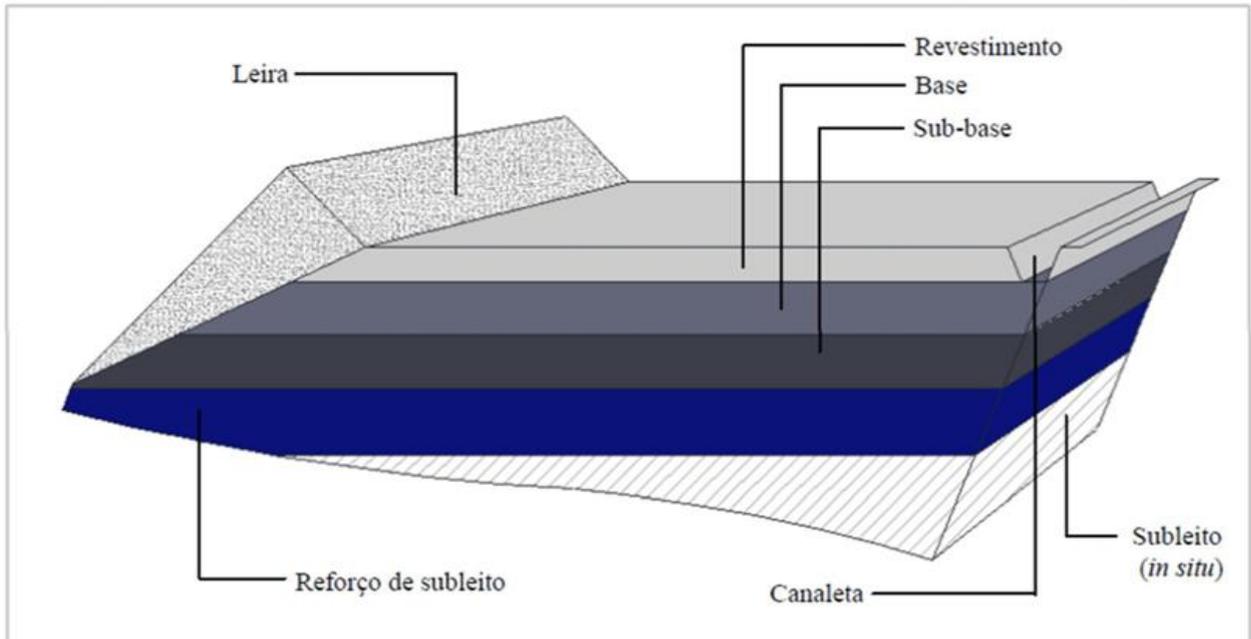


Fonte: Masetti (2011).

No que diz respeito à primeira etapa, ilustrada na Figura 18, pode-se considerar que é igualmente válido iniciar com a análise e quantificação das propriedades incorporadas dos pavimentos a serem construídos, bem como dos pavimentos já existentes. Além disso, as etapas subsequentes do projeto também são concluídas com essa condição.

Um pavimento idealmente dimensionado é composto por diversas camadas, incluindo o revestimento, base, sub-base e reforço do subleito, que são projetados e construídos acima do terreno que normalmente consiste no subleito *in situ*, conforme mostrado na Figura 19. A Figura 19 também apresenta elementos de projeto geométrico, como a leira, e elementos de drenagem, como a canaleta. Esses elementos são essenciais para garantir a adequada funcionalidade e durabilidade do pavimento.

**Figura 19** - Projeto de estrada de mina.



Fonte: Masetti (2011).

As estradas de mina podem ser compostas por uma única camada de revestimento quando o subleito é considerado competente, ou seja, constituído por materiais *in situ* resistentes, proporcionando uma boa capacidade de suporte. Esse método também é aplicado em estradas de mina com uma vida útil relativamente curta. No entanto, quando o subleito não é adequado, é projetado um sistema de duas ou três camadas, geralmente composto por revestimento, base e/ou sub-base.

A camada de revestimento desempenha um papel funcional crucial, oferecendo atração e resistência à abrasão causada pelo trânsito e ao cisalhamento. Além disso, ela transfere a carga dos pneus para a base, protegendo-a da penetração de água superficial.

Para a construção de uma estrada de mina, o revestimento ideal deve considerar os seguintes aspectos.

- Garantir boa trafegabilidade em diferentes condições climáticas.
- Reduzir a geração excessiva de poeira durante períodos secos.
- Minimizar o risco de piso escorregadio durante períodos chuvosos.
- Ser de baixo custo e requerer menos manutenção.

**Base** - a base é uma camada de alta densidade e estabilidade, responsável por distribuir as tensões transmitidas pelos pneus, evitando deformações excessivas na sub-

base e/ou subleito. Além disso, ela protege a sub-base contra alterações volumétricas, como expansão ou desagregação. Uma base sólida é fundamental no projeto de estradas, pois a construção de um acesso sobre um material que não suporta a transferência o peso do trânsito compromete a mobilidade e o controle do veículo, podendo levar à motivação do acesso como um todo.

**Sub-base** - a sub-base, quando considerada no dimensionamento, é geralmente projetada em solos pouco competentes. Geralmente, é composta por material granular. A sub-base exerce diversas funções, como promover a drenagem, minimizar os efeitos de contração e expansão do subleito na estrutura

### 5.2.3 Projeto funcional

O projeto funcional de estradas envolve a seleção adequada de materiais de revestimento que proporcionem economia, conforto e segurança ao tráfego dos veículos. Um aspecto importante a ser considerado é o controle da geração de poeira excessiva, que é causada principalmente pela abrasão de material particulado. Para reduzir a poeira, são utilizados sistemas de aspersão fixados ao longo das estradas e caminhões-pipa. No entanto, a umectação das vias nem sempre é eficiente devido a fatores como a exposição ao sol e a secagem rápida do pavimento. Ferreira (2007) estuda técnicas de tratamento para mitigar a poeira e destaca a possibilidade de aplicação de material betuminoso seguido de areia grossa ou pedrisco e compactação.

Tannant e Regensburg (2001) mencionam líquidos estabilizantes e polímeros como métodos eficazes para o controle de poeira. Alguns exemplos incluem asfaltos emulsificados, produtos à base de cloro de cálcio, linossulfatos de cálcio e surfactantes adicionados ao solo. De modo geral, os tratamentos mencionados acima fornecem uma certa impermeabilização à camada de revestimento. Eles são considerados mais duradouros do que o uso simples ou combinação de materiais encontrados nas minas, pois criam uma película selante sobre o revestimento. Recomenda-se o uso desses procedimentos em estradas de mina com vida útil prolongada. Eles são considerados mais duradouros do que o uso simples ou combinação de materiais encontrados nas minas, pois criam uma película selante sobre o revestimento. Recomenda-se o uso desses procedimentos em estradas de mina com vida útil prolongada.

### 5.2.4 Projeto de drenagem

A elaboração e implementação de um projeto de drenagem são essenciais em estradas de mina, uma vez que um dos principais problemas que percorreram as estradas não pavimentadas é a causada pelo escoamento superficial e acúmulo de água no leito e nas margens. A água pode fornecer escoamento superficial na própria estrada ou de áreas adjacentes. O objetivo do projeto de drenagem é coletar e direcionar a água para escoadouros naturais, artificiais, bacias de retenção ou outros sistemas de retenção presentes no terreno adjacente (Oliveira et al., 2009; Griebeler et al., 2005; Griebeler, 2002).

Quanto menos tempo a água permanecer sobre as estradas, em suas margens, ou infiltrada nas arquibancadas, menor será o dano causado. Por isso, é importante garantir o direcionamento e o escoamento adequados da água superficial ao longo da estrada, tanto longitudinalmente como transversalmente, e também a drenagem da água infiltrada nas relações institucionais, de forma a alcançar a parte inferior da base ou sub-base da estrada. Isso evita a saturação e as sequências seguidas da estrutura da estrada.

## **6. INFRAESTRUTURA E MANUTENÇÃO DO ACESSOS**

A manutenção dos acessos em uma mina é uma atividade crucial que visa garantir a segurança no tráfego de caminhões e reduzir os custos com pneus e combustíveis. Um estudo cuidadoso por RODOVALHO et al. (2016) analisou a influência do desempenho individual dos operadores no consumo de combustível, levando em consideração diferentes habilidades. Concluiu-se que o fator humano não causa mudanças no consumo de combustível, mas as condições das estradas da mina por onde os caminhões trafegam têm um impacto direto na redução do consumo de combustível.

Essas atividades de preparação e manutenção dos acessos são realizadas com o auxílio de equipamentos como tratores de esteira, tratores de pneus, motoniveladoras e rolos compressores. Em um estudo econômico que compara os custos de utilização desses equipamentos auxiliares com as economias geradas na redução do custo com pneus, constatou-se que o custo da carregadeira representa apenas 5% em relação ao benefício.

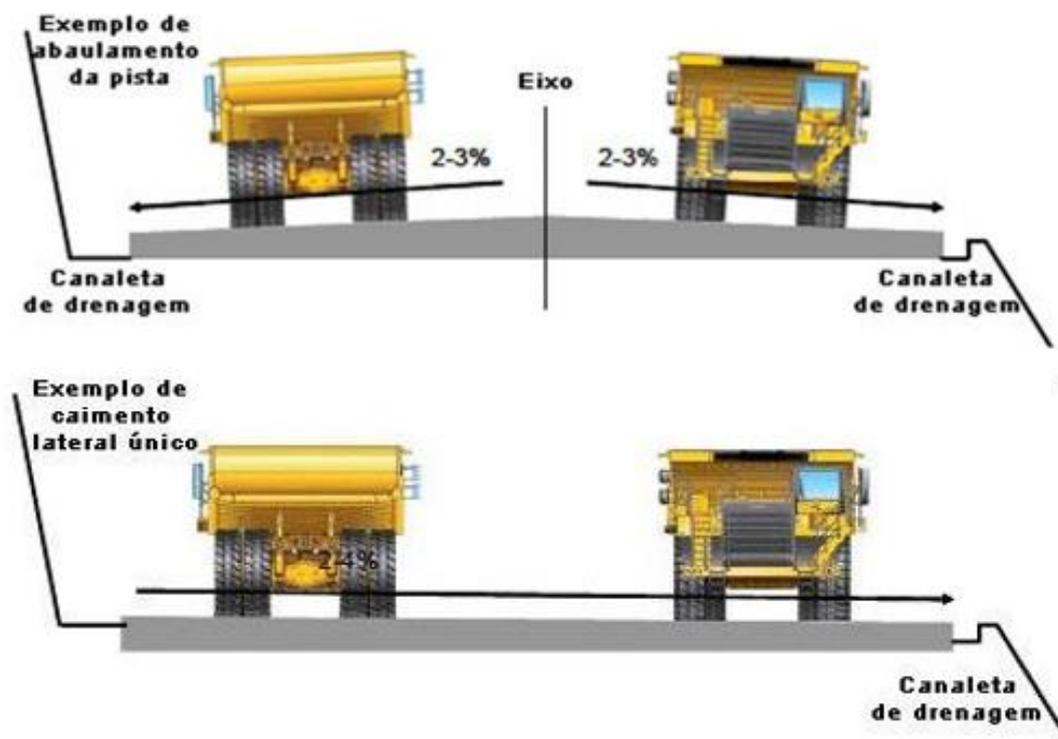
### **6.1 Drenagem nos acessos**

Segundo FERREIRA (2007), o uso mais frequente do planejamento e dimensionamento formal de pavimentos na indústria de mineração traria benefícios

alcançados para a operação das estradas. No entanto, essa prática ainda não é amplamente aceita. Geralmente, a atividade de pavimentação consiste apenas na dispersão de materiais com umidade natural usando motoniveladoras, seguida da compactação superficial pelo peso dos caminhões que trafegam sobre as estradas. Essas condições, juntamente com um sistema de drenagem pouco eficiente, resultam em uma série precoce de defeitos nas vias de acesso.

Devido à ocorrência de chuvas e às ações erosivas causadas pela água, é necessário implementar um sistema de drenagem eficiente nas estradas para direcionar e reduzir o impacto da chuva. Para isso, é importante criar uma inclinação central na pista, direcionando a água para as extremidades (abaulamento transversal), a fim de evitar o acúmulo de água nos acessos. Pode-se observar um exemplo dessa inclinação transversal na figura 20.

**Figura 20** - Inclinação de drenagem nas pistas.

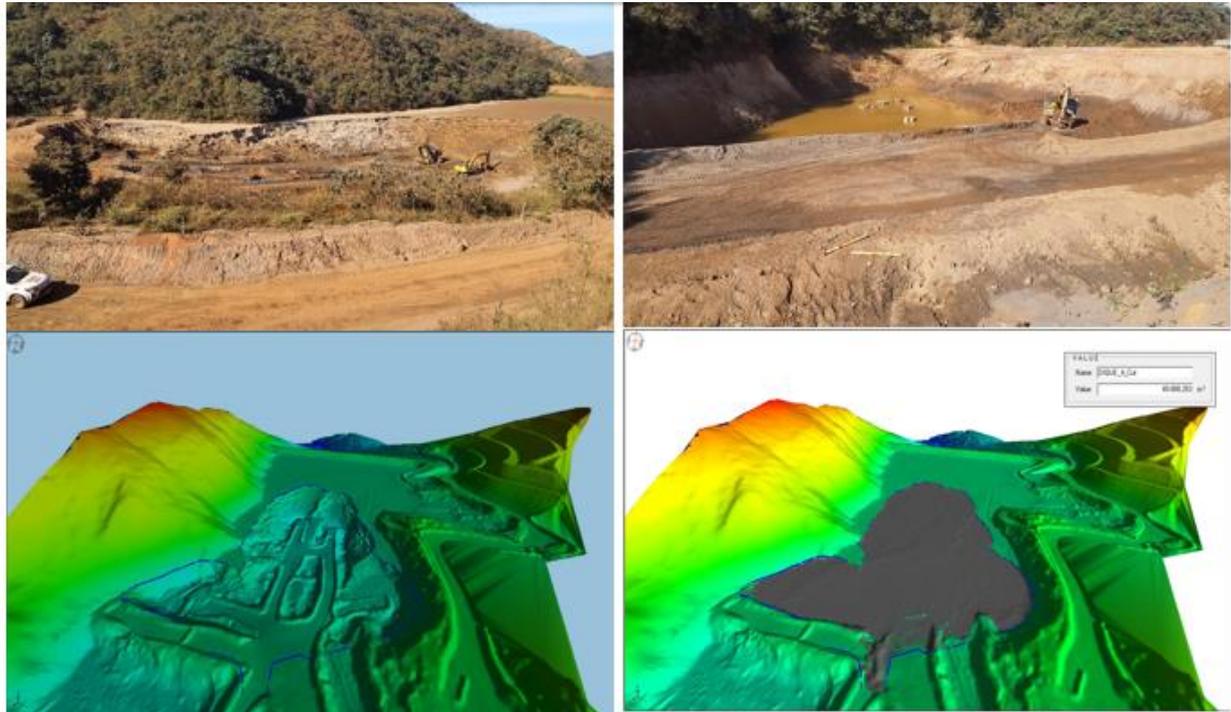


Fonte: Modificado de THOMPSON (2008); REIS (2014).

Quando os acessos estão situados em áreas com um grande fluxo de água e sofrem uma inclinação acentuada (superior a 6%), é crucial reduzir a velocidade da água para evitar o escoamento ao longo dos acessos. Para isso, é recomendada a construção de pequenas bacias que ajudam a dissipar a energia da água, conforme exemplificado na

figura 21. Essas bacias operam como dispositivos de controle de transmissão, proporcionando um ambiente mais estável e protegendo os acessos contra danos causados pela força da força da água. A figura 22 a construção de uma estrutura de drenagem (Sum 17L) na Mina Casa de Pedra, onde em períodos chuvosos o volume de água prejudica o acesso as frentes de lavra necessitando assim de mais canais para escoadouros da mesma.

**Figura 21** - Bacia dissipadora de energia.



Fonte: Acervo do autor.

**Figura 22** – Construção de estrutura de drenagem.



Fonte: Acervo do autor

### **6.1.1 Diques e/ou Bacias de Contenção de sólidos/Amortecimento**

Diques e/ou bacias de contenção de sólidos/amortecimento são estruturas construídas com o propósito de controlar o fluxo de água e reter os sedimentos gerados na mina. À medida que a controlada avançando, essas estruturas são implantadas no interior e/ou ao longo das bordas do platô. A figura 23 mostra a construção da Caixa do Dique do Esmeril IV área que necessitava de ampliação do mesmo, devido ao volume de água recebido em períodos de chuvas intensas.

**Figura 23** – Caixa 04 do Dique do Esmeril IV.



Fonte: Acervo do autor

### **6.1.2 Gabiões**

Os gabiões são estruturas de proteção projetadas para reter grandes volumes de solo. Na mineração, essas estruturas exercem o papel de conter a drenagem que permanece no talude do platô. Por meio do uso de *software* especializado, são elaborados mapas detalhados do fluxo de água, levando em consideração a tendência e as variações topográficas da área da mina. Esses mapas permitem um controle mais preciso das drenagens que devem ser realizadas em períodos pré-determinados.

Além disso, são criados outros mapas, como os mapas de localização, que permitem identificar a área de exploração automatizada para cada plano anual. Esses mapas delimitam os acessos de bordas, os acessos principais e indicam a localização dos gabiões já instalados, assim como aqueles que estão previstos para o futuro. Essas informações auxiliam no planejamento e na gestão eficiente das atividades de mineração, garantindo um controle adequado do fluxo de água e manutenção da estabilidade das estruturas na área da mina.

### **6.1.3 Sistema extravasor de gabiões e bacia de dissipação**

Os sistemas extravasores de borda são projetados com o objetivo de direcionar o escoamento superficial proveniente do topo do platô de gestão do minério, tanto nas áreas já lavradas quanto nas áreas em operação, e de conduzir esse fluxo até a base, onde

deságua nos igarapés. A figura 24 mostra a construção do canal do extravasor do Sump 4, onde o mesmo recebe grande volume de água em períodos de chuvas intensas.

**Figura 24** – Canal enrocado do extravasor do *Sump 4*.



Fonte: Acervo do autor.

#### **6.1.4 Valas de drenagem em curva de nível**

As valas de drenagem são empregadas em áreas onde o escoamento natural da água não é viável para o sistema extravasor de gabiões, estabelecendo um circuito de drenagem em conjunto com essas estruturas. Esse método é especialmente aplicável em minas, uma vez que o aquífero local apresenta uma baixa interação com a água da superfície, além de ser uma solução de custo relativamente baixo.

#### **6.1.5 Drenagem na frente de lavra no período das chuvas**

Durante o período de maior precipitação, que compreende os meses de janeiro a junho, são implementadas diversas atividades de infraestrutura em minas. Entre essas atividades, destaca-se a construção dos *sumps*, que são reservatórios artificiais de água.

Os *sumps* são criados em pontos estratégicos, com o objetivo de recolher qualquer líquido indesejável. Em uma mina, essas depressões desempenham o papel de bacias

de infiltração, responsáveis por gerenciar o escoamento superficial de água proveniente das valas de drenagem. Esses pontos de captação têm a finalidade de evitar que essas águas fluam em direção às áreas de garantia.

Os *sumps* são construídos no início dos acessos paralelos às rampas e nas laterais da área de acompanhamento, de forma a não interferir nas operações em curso. O funcionamento desses reservatórios é da seguinte maneira: o fluxo de água proveniente das vias de circulação é direcionado para esses sistemas de armazenamento. Uma vez armazenado, o excesso de água é removido por meio de duas bombas elétricas, que a direcionam para as bacias de contenção/amortecimento onde estão instalados os sistemas extravasores de gabiões.

Em situações específicas, de acordo com as condições topográficas, pode ser mais adequado direcionar o fluxo diretamente para a bacia de contenção de sólidos, onde se encontra o gabião. Essa decisão fica a cargo da equipe técnica responsável pelas supervisões de campo.

**Figura 25** – *Sump* 17 L 01 02.



Fonte: Acervo do autor

## **6.2 Tipos de defeitos característicos em acessos**

São considerados defeitos as modificações na superfície das estradas que têm um impacto negativo nas condições de uso, comprometendo o desempenho operacional do transporte. O tráfego frequente e as condições climáticas adversas aceleram o processo de condução da superfície dos acessos de mina, especialmente quando não são aplicadas técnicas de manutenção. Para garantir um bom estado dos acessos, é

essencial contar com equipamentos auxiliares e uma equipe capacitada em infraestrutura para realizar manutenções regulares durante as operações. Alguns dos defeitos mais comuns em acessos de mina incluem os seguintes.

Depressões na pista- esses buracos, conhecidos vulgarmente como “panelas”, surgem devido à expulsão contínua de material sólido causada pelo tráfego intenso de equipamentos pesados em áreas onde não há um sistema de drenagem, como ilustrado na figura 26. Para corrigir esse problema, é necessário preencher os buracos como uma medida paliativa, ao mesmo tempo em que se busca melhorar o sistema de drenagem como uma medida preventiva.

**Figura 26** – Condições da pista de rolamento para acesso ao PCN 2.



Fonte: Acervo do autor.

**Poeira**- a geração de poeira é um problema recorrente nas estradas de transporte por caminhões, causando uma nuvem de partículas finas suspensas no ar. Essa poeira é causada pelo tráfego intenso de veículos na operação de transporte e pode representar um risco para a segurança do trânsito devido à redução da visibilidade para os operadores. Esse problema é mais comum em estradas com solo argiloso, onde há uma grande quantidade de material solto na superfície. Para combater esse problema, é importante tomar medidas de manutenção, como a utilização de caminhões-pipa ou a instalação de sistemas de aspersão fixa para controlar a poeira por meio da umectação.

No caso dos caminhões-pipa, é recomendado fazer uma irrigação intermitente a cada 15 metros, a fim de evitar o excesso de água na pista. A Figura 27 demonstra a umectação das vias em períodos de grandes estiagem ou dias muito quentes, torna-se necessário molhar as vias, uma vez que a geração de material particulado (poeira) é muito grande.

Figura 27 - Umectação das vias



Fonte: Acervo do autor

### **6.3 Regularização de depósitos**

A regularização do reservatório é um aspecto importante da infraestrutura de mina. Essa etapa consiste no nivelamento da área minerada, preparando-a para a reabilitação. Durante esse processo, é realizada a remoção de resíduos orgânicos, como galhos e restos de vegetação, para que possam ser devidamente incorporados e incorporados no solo, confiantes para o processo de recuperação ambiental.

### **6.4 Acessos**

Os acessos desempenham um papel fundamental na interligação das diferentes áreas de geração mineral. Eles são utilizados para transportar o minério extraído das linhas de produção ou estágio de britagem primária. Esses acessos são estrategicamente posicionados de forma a facilitar o escoamento da produção e a drenagem adequada, já que a presença de água pode causar instabilidade nas operações, prejudicando o ritmo

de produção.

O perfil dos acessos é projetado para garantir uma operação uniforme de transporte do minério e fluxo dentro da mina. A escolha do plano de acesso leva em consideração os custos envolvidos na construção das estradas, especialmente aqueles relacionados à terraplanagem. Além disso, são consideradas as características geomorfológicas e geotécnicas das áreas atravessadas para realizar cortes e aterros.

Em algumas situações, as condições desfavoráveis do solo natural podem exigir serviços especiais, como escavações e obras de estabilização de taludes, que envolvem altos investimentos. Reduzir a altura de um corte ou aterro pode eventualmente diminuir os custos de um trecho de estrada. No entanto, essa decisão nem sempre pode ser tomada, uma vez que diversos aspectos técnicos devem ser considerados, como requisitos mínimos para o desenvolvimento de um acesso, pontos de conexão com outras estradas, altura mínima do aterro necessária para proteção contra enchentes, entre outros parâmetros.

As vias de circulação na mina são compostas por rampas operacionais e acessos de contorno, sendo essenciais para o funcionamento adequado das atividades.

#### **6.4.1 Rampas operacionais**

As principais vias de tráfego são estrategicamente iniciadas para dividir os blocos de transmissão e atravessar suas áreas de produção, de modo que as linhas de produção sejam atendidas para essas vias. A construção dessas vias principais de circulação é realizada para garantir o melhor desempenho dos caminhões de transporte, assegurando a manutenção do ritmo de produção.

Ao construir o perfil longitudinal da estrada, ou seja, o acesso principal para a circulação da produção de mineração, são coletados dados sobre as características do terreno onde a via será inserida. Levando em consideração a topografia da área, sempre que possível, é recomendável utilizar rampas suaves e curvas com raios grandes, para permitir que os veículos trafeguem com velocidade uniforme. No entanto, à medida que o terreno se torna mais acidentado, a construção de rampas suaves e curvas de grande raio requer uma movimentação maior de terra, gerada em cortes e aterros mais extensos, o que acarreta em custos mais elevados.

Além disso, de acordo com a NRM 22, subitem 22.7.7.1, as vias devem ser devidamente sinalizadas para garantir condições de tráfego em qualquer rota de trabalho e devem ser mantidas em condições de uso.

Quanto às inclinações dos acessos, são considerados os critérios avaliados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), especialmente no que se refere ao escoamento da produção.

## **7. INDICADORES DE DESEMPENHO**

De acordo com Lima (2005), um indicador de desempenho é uma combinação de medidas que fornecem informações e dados sobre o quão eficientemente um produto ou processo tem sido executado, facilitando a tomada de decisões pela liderança da mina.

Na indústria de mineração, uma ampla variedade de indicadores de desempenho é utilizada para avaliar o grau de eficiência em diversas etapas do trabalho, desde a exploração mineral até o desempenho econômico. No contexto das operações de mina, têm-se exemplos de indicadores como: tempo de carregamento, tempo de basculamento, tempo de transporte, tempo de conversação, inclinação das pistas e rampas, distância até a descarga, massa carregada por hora, massa produzida por hora, relação estéril-minério (REM) e outros. É importante destacar que cada tipo de material possui valores de referência específicos para sua exploração. Por exemplo, a relação estéril-minério (REM) em uma lavra de minério de ferro geralmente será maior do que em uma pedreira, devido aos diferentes valores de venda dos materiais envolvidos.

Os indicadores mencionados podem ser agrupados em três categorias principais, cada uma relacionada a diferentes setores ou gerenciais em uma mina, como se segue.

Indicadores de Distância Média de Transporte (DMT)- esses indicadores são derivados do planejamento de lavra, onde as frentes de lavra são projetadas e sequenciadas. A DMT é uma influência geralmente inflexível, pois as mudanças contribuíram para uma revisão e rearranjo completo do plano geral do projeto. Ela está diretamente relacionada à distribuição do minério no local e à localização das instalações fixas, como a usina e o depósito de estéril.

Indicadores de velocidade média- esses indicadores são influenciados pelos trabalhos de infraestrutura da mina. Eles conseguiram os tempos variáveis presentes nas operações, como o tempo gasto em movimento com carga e o tempo gasto em movimento vazio. Em resumo, a infraestrutura instalada determina as velocidades máximas instantâneas que os veículos de rodas podem atingir em diferentes trechos da mina.

Indicadores de tempos fixos- esses indicadores referem-se a tempos de tarefas cíclicas e são monitorados pela operação de lavra. O objetivo da operação é distribuir os

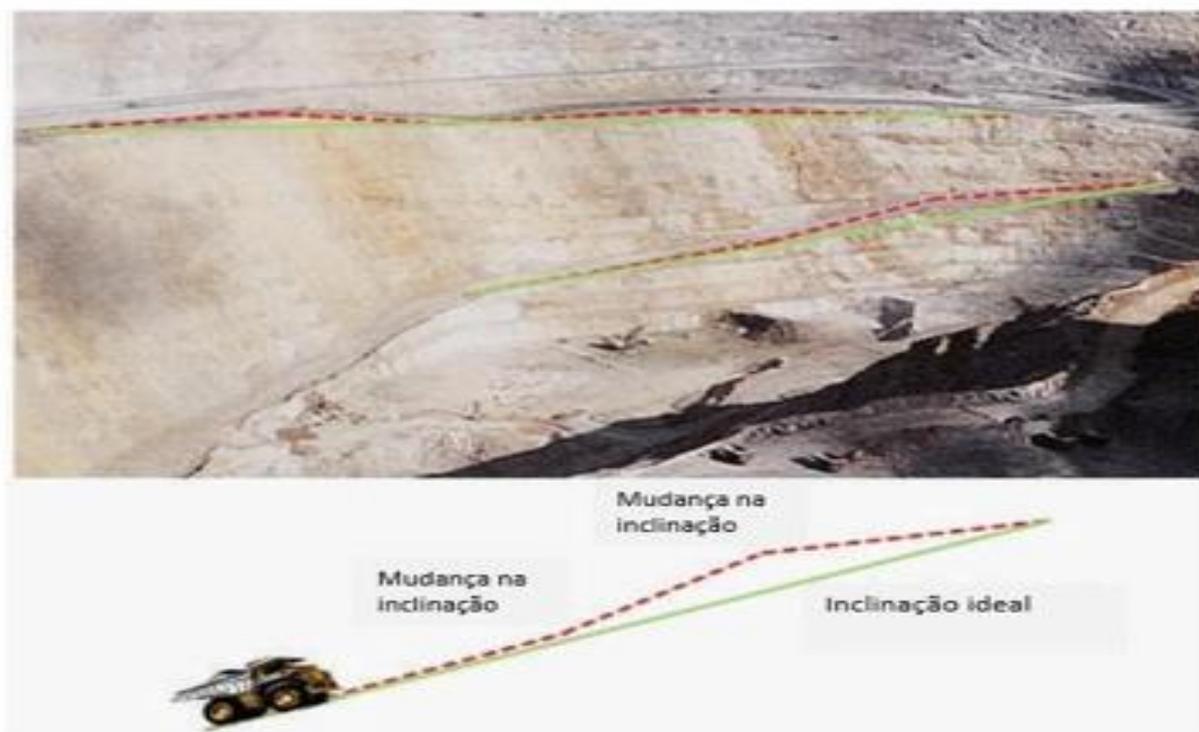
equipamentos de operação na mina e reduzir os tempos fixos, visando melhorar a produção. Alguns exemplos de tempos fixos para caminhões são: tempo gasto em manobras, tempo de espera na fila para carregamento, tempo de carregamento, tempo de espera na fila para basculamento e tempo de basculamento, além dos tempos de paradas para desmonte.

No que diz respeito à infraestrutura, as variáveis que mais impactam na produtividade estão relacionadas à trafegabilidade dos acessos, que podem alterar o rendimento dos equipamentos, resultando na redução da produção e aumento dos custos.

Segundo um estudo controlado por Thompson e Visser (2003b), foi evidenciada a influência do coeficiente de rolamento e da inclinação nos custos operacionais de transporte, nas necessidades de manutenção e nas condições da camada funcional dos pavimentos. Os resultados da pesquisa apreciaram que, ao aplicar um projeto bem elaborado e executado tranquilos como tradicionais, a superfície torna-se mais resistente às cargas e ao tráfego dos equipamentos, sofrido em menos danos e alterações, o que, por sua vez, diminui a resistência ao rolamento. Portanto, é de extrema importância que todos os projetos estejam bem definidos para minimizar a resistência ao rolamento ao máximo possível.

A resistência ao rolamento é uma força que atua contrariamente ao movimento do veículo, representando as perdas de energia causadas pelo afundamento da roda no terreno. A figura 28 retrata as variações de gradiente que podem surgir em vários trechos das minas, isso ocorre, uma vez que o corpo mineralizado se encontra em grandes profundidades, acarretando assim maiores inclinações para a retirada do mineral minério de interesse.

**Figura 28** - Variações de gradiente ao longo do acesso.

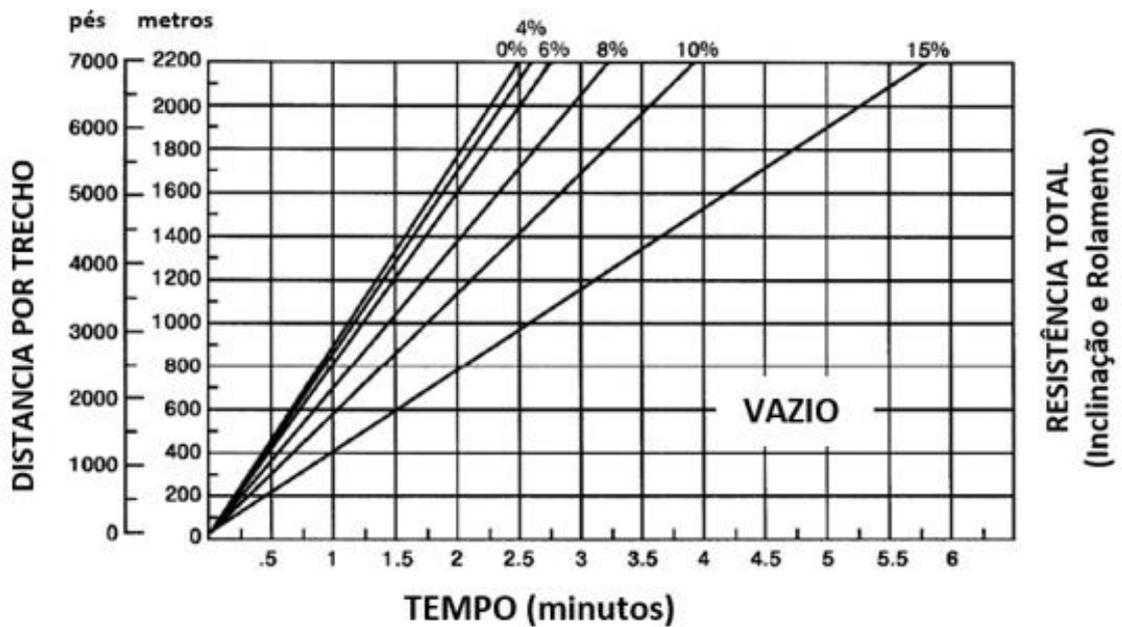


Fonte: Modificado de Thompson (2014).

No que diz respeito à produção, a inclinação das rampas e a resistência ao rolamento têm um papel crucial na velocidade de transporte dos equipamentos, uma vez que essas variáveis controlam diretamente o ciclo operacional e, por consequência, a produtividade da mina. Segundo Thompson (2014), cada aumento de 1% na resistência ao rolamento resulta em uma redução de 10% na velocidade em rampas e 26% nos trechos horizontais de acesso.

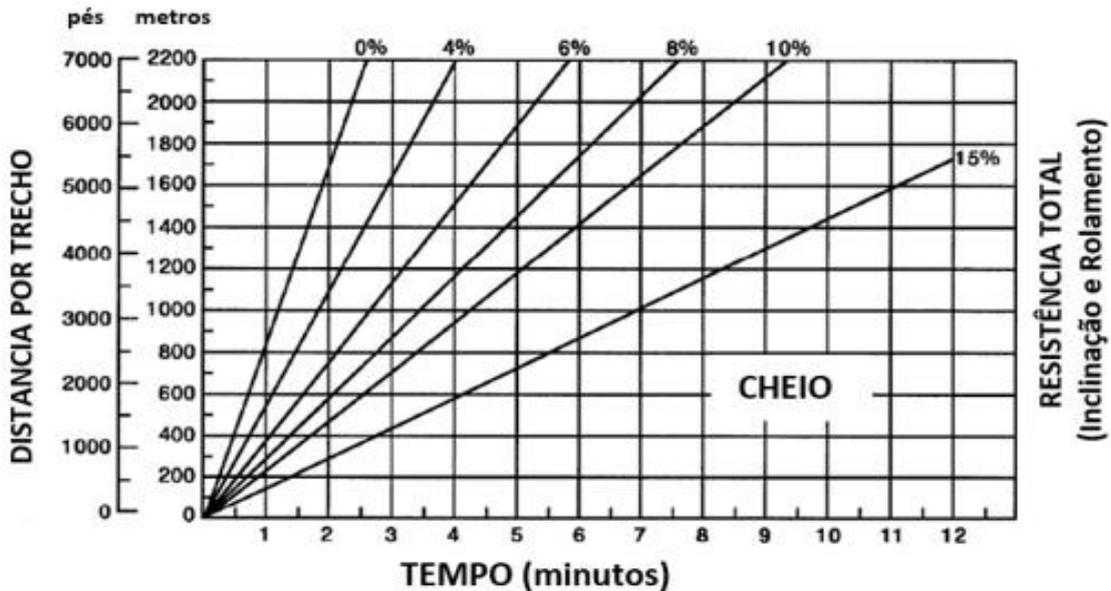
Na mineração, é comum abordar a resistência ao rolamento e a inclinação em termos percentuais, de modo que cada acréscimo de 1% na resistência representa um aumento de 10 kg por tonelada na carga total aplicada à superfície. Isso significa que o motor do caminhão precisa empregar mais esforço para superar as resistências encontradas, seja em uma via com irregularidades ou em uma rampa elevada. Para ilustrar o impacto dessas variáveis, a Figura 26 apresenta numericamente a influência da resistência total no tempo de trajetória do equipamento quando está vazio, enquanto a Figura 27 mostra o mesmo impacto quando o equipamento está carregado.

**Figura 29** - Tempo de transporte vazio do caminhão CAT 793C com variação da resistência total.



Fonte: Modificado de Tannant e Resenburg (2001).

**Figura 30** - Tempo de transporte carregado do caminhão CAT 793C com variação da resistência total.



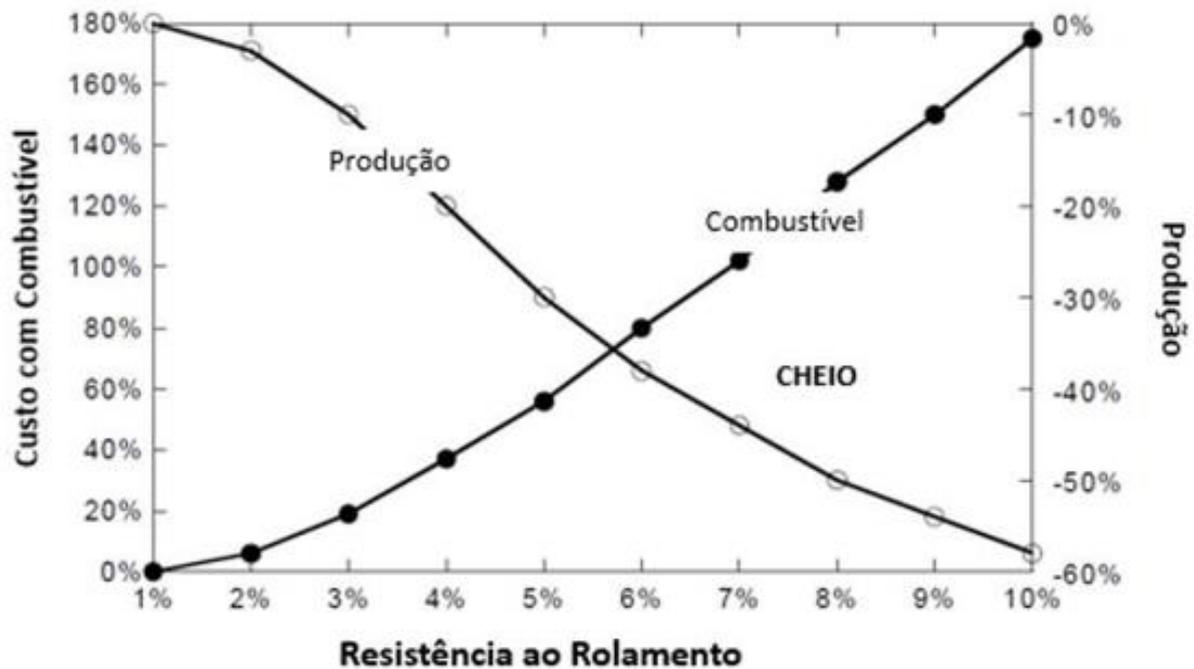
Fonte: Modificado de Tannant e Resenburg (2001)

Quando o tempo de ciclo em uma mina é consideravelmente maior do que o previamente dimensionado, isso acarreta perdas devido a filas e paradas excessivas. Isso ocorre porque um tempo de ciclo muito prolongado resulta em um número maior de equipamentos do que o necessário, o que acarreta em desperdício de recursos. Além disso, o acúmulo de veículos em filas durante a operação resulta em custos adicionais de

combustível, uma vez que os equipamentos acabam gastando mais tempo parados do que realmente se deslocando e trabalhando, resultando em uma redução significativa na produção por hora.

Esses efeitos negativos das forças contrárias ao movimento do caminhão são ilustrados e destacados na Figura 28.

**Figura 31** - Influência da resistência de rolamento no desempenho de mina.



Fonte: Modificado de Tannant e Resenburg (2001).

A existência de acessos bem projetados e bem conservados na mina proporciona uma série de benefícios, incluindo melhorias na produção, redução do desgaste dos equipamentos, menor frequência de substituição de componentes, aumento da vida útil.

Conseqüentemente, é de extrema importância dedicar atenção aos projetos de vias de acesso na mineração, considerando minuciosamente todas as variáveis relevantes. Isso visa aprimorar a relação custo-benefício, otimizando não apenas os gastos de construção, mas também para garantir que o trabalho ocorra de maneira adequada.

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para realização do estudo, levou-se em consideração parâmetros que afetam todo o ritmo de produção acarretando em prejuízo para empresa caso os mesmos não estejam perfeitamente dimensionados e calculados.

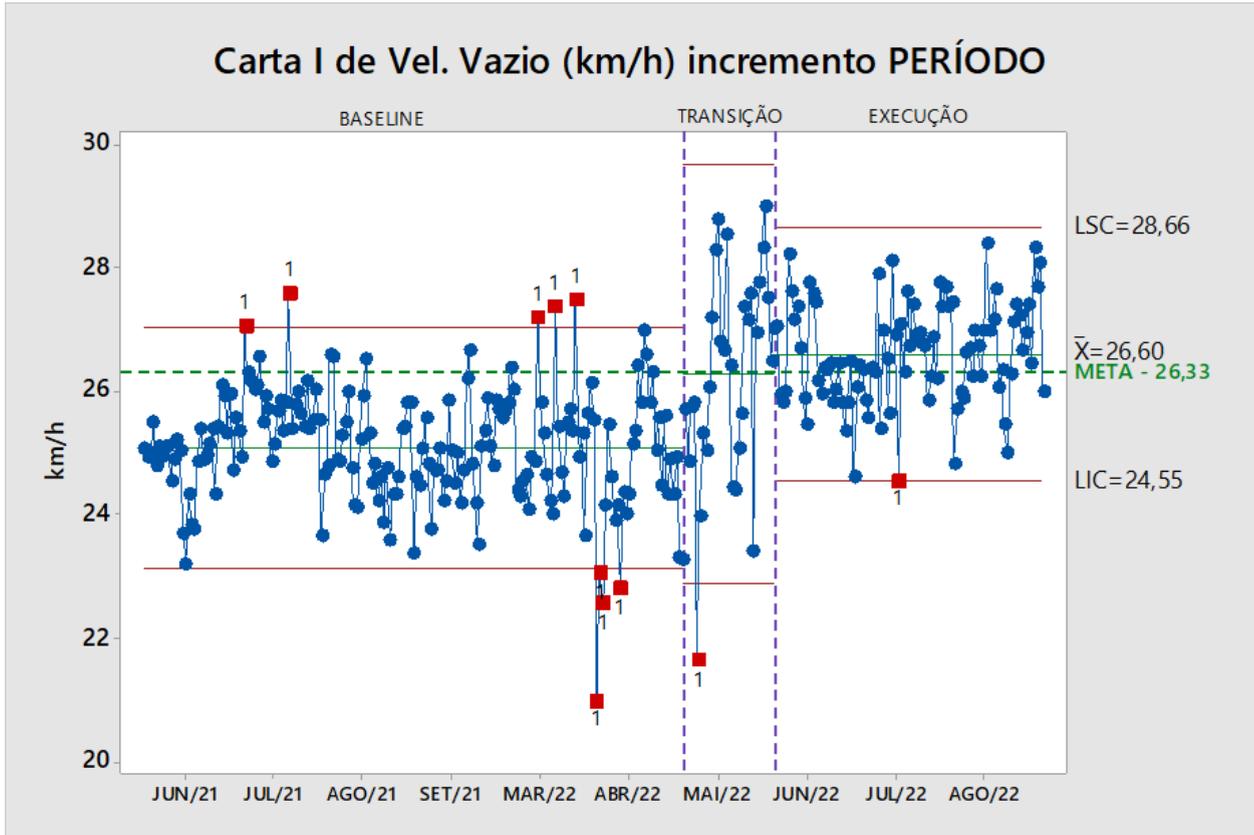
Os critérios adotados para a análise dos resultados foram: a produtividade, a velocidade média dos caminhões, a distância média de transporte (DMT), e tempos de carregamentos e descargas.

Foram avaliados dados de tempos e de velocidades médias nos períodos de junho de 2021 a agosto de 2022 da frota de caminhões fora de estrada com capacidade de 240 toneladas. O tipo de equipamento e suas especificações foram as mesmas durante todo este período.

O trabalho faz referência às condições de pista nos períodos de seca e foco em velocidade média vazio, porém, tem-se melhor performance na velocidade média cheio pelas condições favoráveis das pistas.

O gráfico da figura 32 mostra o material comparativo feito pela SOTREQ com a ferramenta FPC (Programa de Produção e Análise de Custos de Frota), onde simula a condição ideal versus a realidade, como primeira análise e depois simula a condição levantada na primeira medição versus a condição pós projeto.

Figura 32 - Movimentação de carga - caminhão vazio.



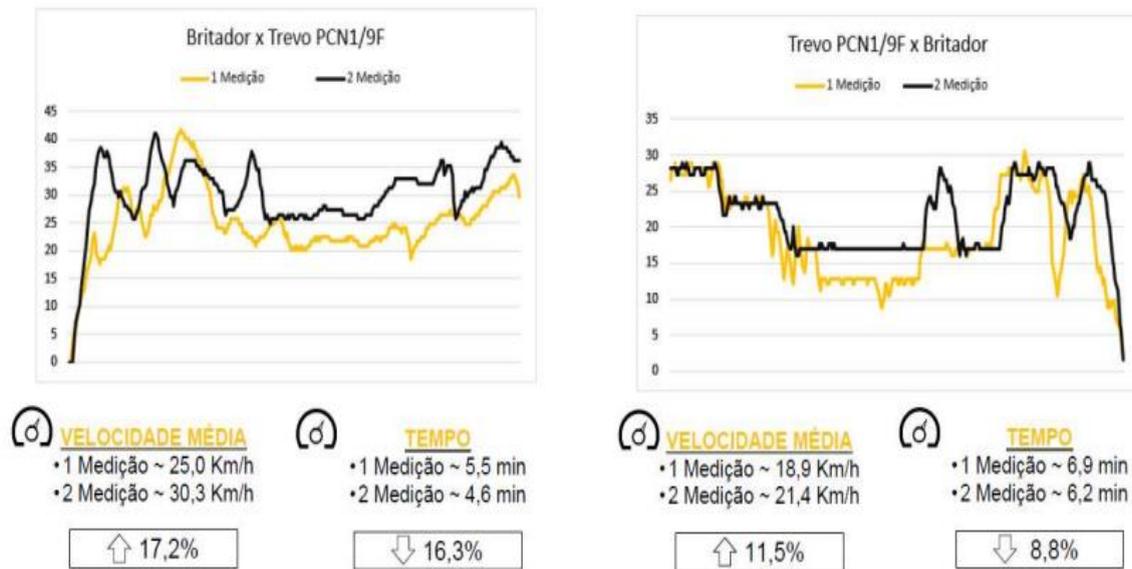
Fonte: Modificado de Tannant e Resenburg (2001).

Os pontos vermelhos indicam subgrupos que falharam em pelo menos um dos testes para causas especiais e não estão sob controle. Se o mesmo ponto apresentar falha em vários testes, o ponto é marcado com o menor número de teste para evitar confusão no gráfico. Se o gráfico mostrar pontos fora de controle, são esses pontos que deverão ser investigados. As siglas LSC e LIC são: LSC – limite superior de controle; LIC – limite inferior de controle.

Os pontos fora de controle podem influenciar as estimativas dos parâmetros do processo e evitar que limites de controle representem verdadeiramente o seu processo. Se os pontos fora de controle forem devidos a causas especiais, considere a omissão desses pontos dos cálculos. A figura 33 mostra os gráficos de velocidade média no trecho entre o britador e a região do mascate com o caminhão vazio e o caminhão cheio.

**Figura 33** – Ciclo entre britador e a região do mascate.

Devido as diferenças no trajeto, foi realizado análise de velocidades médias e pressões médias das suspensões apenas no trecho similar entre o Britador e o Trevo PCN1/9F.

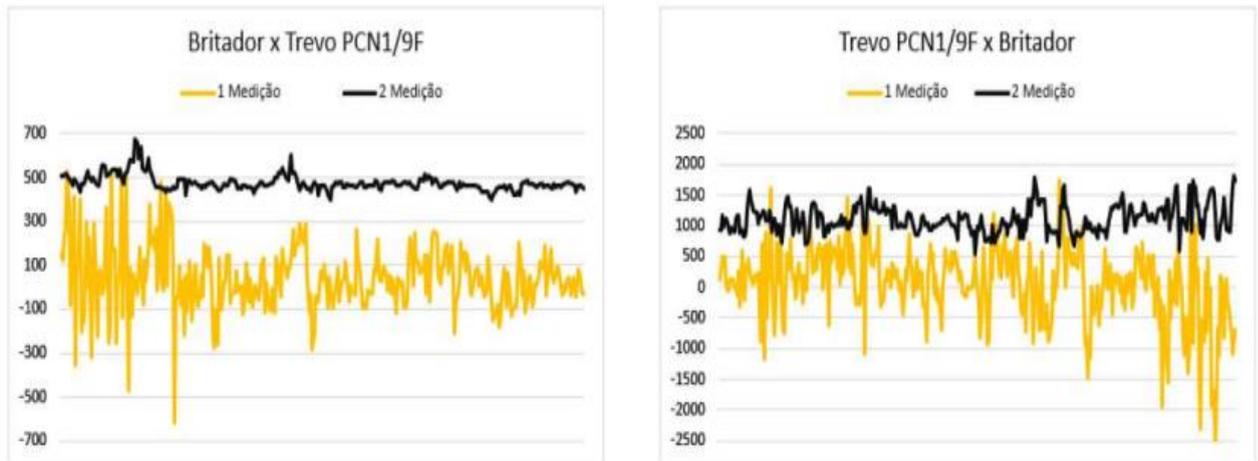


Fonte – acervo do autor.

De acordo com a análise dos gráficos, nota-se que na primeira medição, realizada no deslocamento do caminhão inicialmente com uma velocidade média de 25 km/h do britador até o trevo do PCN1/9F, o tempo gasto foi de 5,5 minutos. Já na segunda medição, com uma velocidade de 30 km/h, o tempo gasto no mesmo trajeto foi de 4,6 minutos, o que demonstra que, com o aumento da velocidade em 17,2%, houve uma diminuição de 16,3% no tempo de ciclo. No deslocamento do Trevo PCN1/9F para o britador, a primeira medição foi com uma velocidade média de 18,9 km/h com um tempo de 6,9 minutos, a segunda medição foi realizada com uma velocidade média de 21,4 km/h com um tempo de 6,2 minutos, mostrando que com o aumento de 11,5% na velocidade o tempo reduziu em 8,8%, o que pode gerar um impacto significativo na produção. A figura 34 mostra a variação sofrida nas suspensões dos caminhões no trecho do britador e a frente de lavra na região do mascate.

**Figura 34** – Ciclo entre britador e região do mascate – Pressões na suspensão.

Pressões médias das suspensões no trecho similar entre o Britador e o Trevo PCN1/9F.

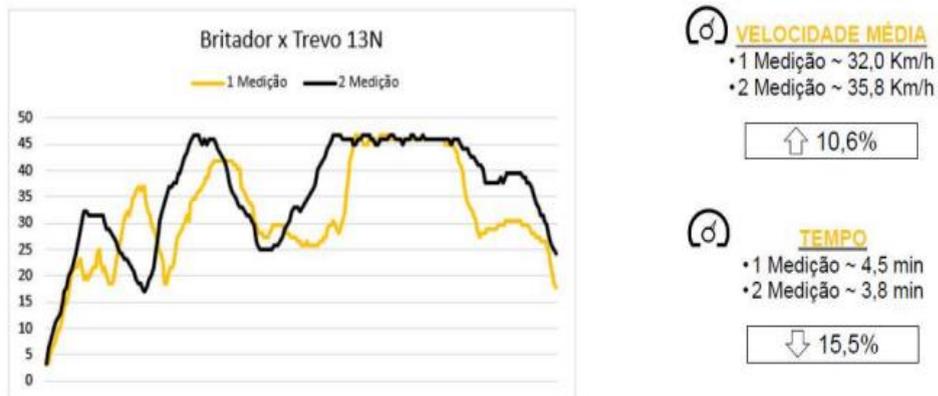


Fonte – acervo do autor.

O gráfico da figura 34 mostra a pressão sofrida pelas suspensões dos caminhões em determinados trechos. O deslocamento do trecho do britador para o trevo PCN1/9F faz com que as pressões sofridas na suspensão do caminhão na primeira medição sejam variáveis, de -700 a 500 psi. Por outro lado, no mesmo trajeto a segunda medição retrata uma pressão quase constante em torno de 500 psi, demonstrando que possivelmente neste trajeto ocorreu regularização da pista, ou seja, aconteceu a manutenção no acesso. Já no caminho inverso, do trecho do trevo do PCN1/9F para o britador, a primeira medição detectou uma pressão oscilatória, indo de -2500 a 1500 psi. Na segunda medição a pressão nas suspensões dos caminhões tendeu a permanecer constante em torno de 1000 psi. Observando os dois gráficos, podemos destacar que tanto na medição 2 do gráfico à esquerda da figura 34, quanto na medição 2 do gráfico à direita da figura 34, as pressões permaneceram constantes, isso ocorreu devido a estes trechos passarem por uma conformação nos acessos. A figura 35 demonstra as medições de velocidade média e tempo no trecho entre o britador e o trevo 13 N.

**Figura 35** – Ciclo entre britador e a região do Engenho.

Devido as diferenças no trajeto e impactos de trabalhos sendo realizado em parte do trajeto, foi realizado análise de velocidades médias e pressões médias das suspensões apenas no trecho similar entre o Britador e o Trevo 13N.

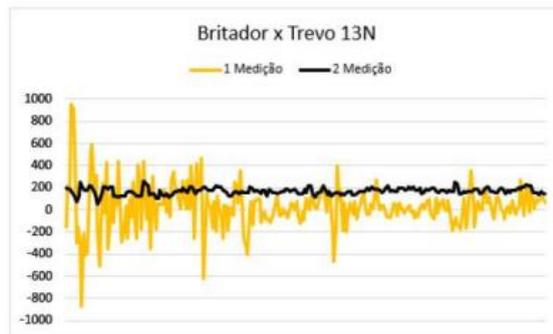


Fonte – acervo do autor.

A análise do gráfico da figura... mostra que, na primeira medição realizada no deslocamento do caminhão, inicialmente com uma velocidade de 32 km/h, do britador até o trevo 13N, o tempo gasto foi de 4,5 minutos. Por outro lado, a segunda medição, feita a uma velocidade de 35,8 km/h, o tempo gasto foi de 3,8 minutos, demonstrando que, com o aumento da velocidade em 10,6%, houve uma diminuição de 15,5% no tempo de ciclo o influência na produção.

**Figura 36** – Ciclo entre britador e a região do engenho – Pressões na suspensão.

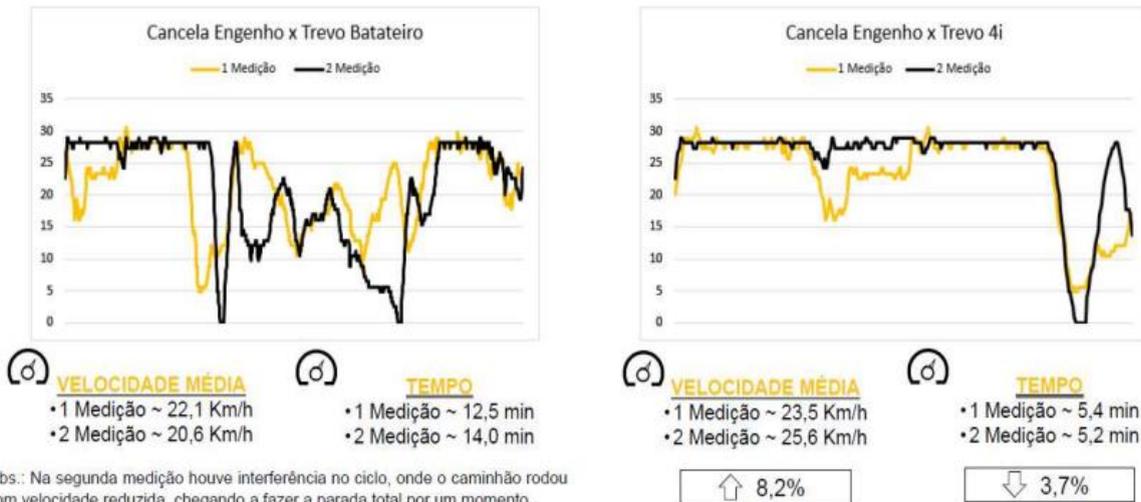
Pressões médias das suspensões no trecho similar entre o Britador e o Trevo 13N.



Fonte – acervo do autor.

**Figura 37** – Ciclo entre a Região do engenho e o depósito Batateiro.

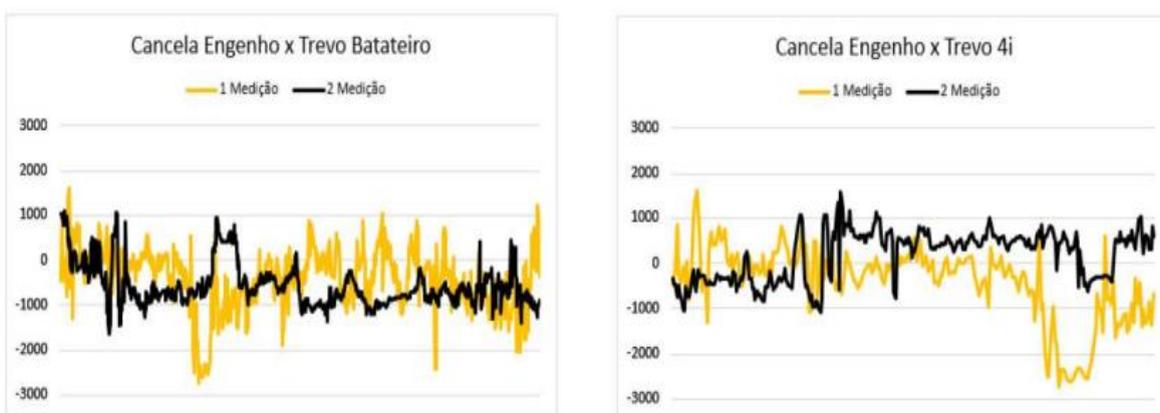
Devido as diferenças no trajeto, foi realizado análise de velocidades médias e pressões médias das suspensões no trecho similar entre a Canela Engenho e o Trevo Deposito Batateiro e no trecho entre a Canela Engenho e o Trevo 4i.



Fonte – acervo do autor.

**Figura 38** – Ciclo entre a região do engenho e o depósito Batateiro – Pressões na suspensão.

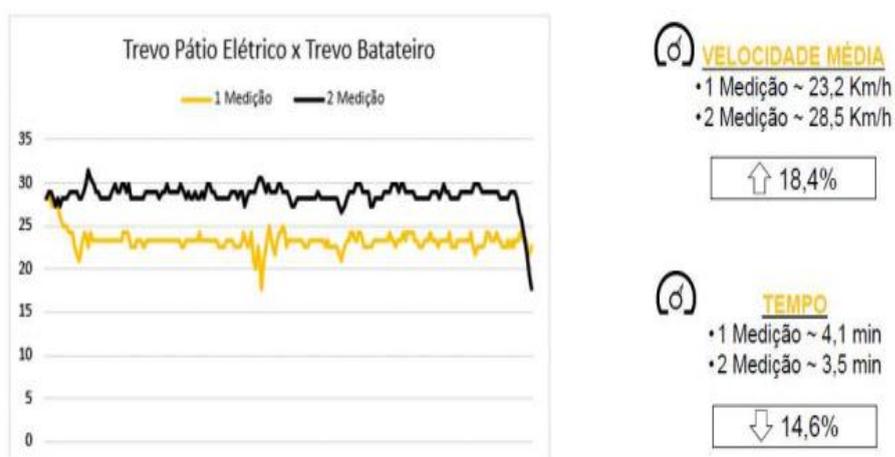
Pressões médias das suspensões no trecho similar entre o Trevo 13N e o Trevo Deposito Batateiro e no trecho entre o Trevo 13N e o Trevo 4i.



Fonte – acervo do autor.

**Figura 39** – Ciclo entre a região do mascate e o depósito Batateiro

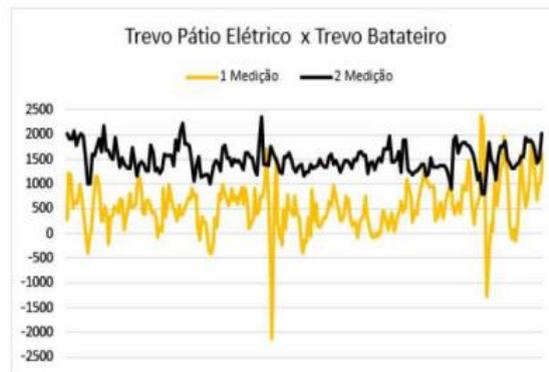
Devido as diferenças no trajeto, foi realizado análise de velocidades médias e pressões médias das suspensões apenas no trecho similar entre o Trevo Mascate Pátio Elétrico e o Trevo Depósito Batateiro.



Fonte – acervo do autor.

**Figura 40** – Ciclo entre a região do mascate e o depósito Batateiro – Pressões na suspensão.

Pressões médias das suspensões no trecho similar entre o Trevo Mascate Pátio Elétrico e o Trevo Depósito Batateiro.



Fonte – acervo do autor.

Para cálculo da produtividade levou-se em conta o *payload* da frota de transporte dividido pelos tempos, convertidos em hora, gastos pelo equipamento de carga mais o equipamento de transporte, ou seja, tempos gastos em cada fase do ciclo do equipamento de transporte.

A velocidade reduz o tempo de ciclo quanto ao deslocamento; com isso tem-se maior movimentação dentro do intervalo de 1 hora.

No período analisado em 2022 ocorreu um aumento de 18,72% na movimentação de massa somente com aumento da velocidade média.

### **Cálculo de Produtividade**

**Produtividade (t/h) = *Payload* (t)/( tempo gasto para percorrer a distância total (ciclo cheio + vazio)(h) + tempos (Fila Carga + Manobra Carga + Ag. Carga + Carregamento + Fila Basc. + Manobra Basc. + Ag. Basc. + Basculando + N. Det.)(h)).**

## **9. CONCLUSÕES**

Com base nas observações feitas, é possível concluir que o desempenho da mineração a céu aberto está diretamente ligado às condições da infraestrutura da mina. A qualidade dos trabalhos nas operações de carregamento, da conservação das estradas e rampas, da operacionalização das frentes de lavra e pilhas de estéril, das drenagens substituídas e do controle da estabilidade dos taludes determina os resultados alcançados pela mina. Esses fatores podem influenciar significativamente os custos e a produção em diversos níveis.

O planejamento de lavra tem como objetivo principal criar um projeto de mina que permita extrair o máximo de minério possível com o mínimo de remoção de estéril, considerando uma distribuição e configuração viáveis para a operação. É fundamental buscar a menor distância de transporte entre as frentes de lavra e os locais de descarga. Ao elaborar o projeto de estradas de mina, os estudos preliminares devem estabelecer parâmetros geométricos emocionantes, levando em conta os equipamentos que serão utilizados, tais como largura da pista, raio de curvatura e inclinação das rampas.

A existência de boas condições de acesso resulta em custos operacionais reduzidos. É altamente recomendável implementar uma arquitetura bem definida para as estradas da mina, pois o excesso de manutenção ou o tráfego intenso inevitavelmente levarão a uma redução na produtividade da frota.

Além disso, de acordo com Thompson (2014), o projeto das estradas deve ser desenvolvido a partir de estudos que consideram parâmetros, funcionalidades e de manutenção de forma integrada. Caso algum dos componentes do projeto não esteja de acordo com a realidade ou não seja considerado, os demais componentes não funcionarão conforme o planejado.

Em um contexto cada vez mais competitivo na indústria de mineração, é de extrema importância implementar projetos que visem à redução de custos e à maximização dos ativos. Aprimorar os índices operacionais, com foco no desenvolvimento eficiente da lavra, torna-se uma necessidade crucial para garantir a sustentabilidade do negócio.

Os resultados obtidos com a melhoria dos perfis de transporte, aumento da velocidade média e diminuição dos tempos e ciclos dos veículos, foram altamente positivos. Durante o período de junho 2021 a agosto de 2022 houve um aumento de 18,72% na movimentação de massa somente com aumento da velocidade média.

O aumento da velocidade reduz o tempo de ciclo quanto ao deslocamento, com isso tem-se maior movimentação dentro do intervalo de 1 hora, resultando assim em

aumento de produção, o que conseqüentemente resulta em uma maior na lucratividade da empresa nesse período. Esses resultados destacam que essa melhoria estava diretamente ligada ao aumento da velocidade e não a outros parâmetros, como a Distância Média de Transporte (DMT) por exemplo.

Com base nas observações realizadas, fica evidente que o desempenho da mineração a céu aberto está diretamente relacionado às condições da infraestrutura da mina. A qualidade das praças de carregamento, das estradas e rampas, da operacionalização das frentes de lavra e pilhas de estéril, das drenagens atendidas e da estabilidade dos taludes são determinantes para os resultados alcançados pela mina. Esses fatores podem influenciar significativamente os custos e a produção em diversos níveis.

Portanto, uma interface eficiente entre os setores da lavra, que engloba o planejamento, a operação e a infraestrutura, é fundamental para garantir uma produção que seja eficiente, econômica, segura e sustentável. A cooperação e coordenação entre essas áreas são essenciais para alcançar um ótimo desempenho e alcançar os objetivos de forma consistente.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Vivianne de Cássia Paixão. **A importância das operações de infraestrutura de mina - um estudo sobre as atividades realizadas na lavra de bauxita pela Mineração Paragominas S/A. 2014. 76 f.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Curso de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.unifesspa.edu.br/handle/123456789/467> >. Acesso em: 10 de mai. de 2023.

BAZANTE, A. J. **A interação entre o planejamento e controle de qualidade na maximização da função benefício de um empreendimento mineral. 2004.** Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. 105.p.

BRANDÃO R.; TOMI, G. Metodologia para estimativa e gestão da produtividade de lavra. Rem: **Rev Esc Minas [Internet]**. 2011, Jan; 64(1):77–83. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672011000100010>. Acesso em: 12 de ag. de 2023.

CAT, 2023. Catálogo de Produtos.Caminhões de Mineração. Disponível em:< [https://www.cat.com/pt\\_BR/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/116180.html](https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/116180.html)>. Acesso em 13 de out. de 2023.

COUTINHO, H. L. **Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto.** 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/9435>. Acesso em: 10. de ago. de 2023.

CURI, A. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 232.p.

CURI, Adilson. **Lavra de Minas.**1.ed. São Paulo. Oficina de texto,2017.462.p.

DNPM, 2001 . **Normas Reguladoras de Mineração – Lavra a Céu Aberto.** Disponível em:[https://anmlegis.datalegis.inf.br/action/TematicaAction.php?acao=abrirVinculos&cotematica=10060632&cod\\_menu=6783&cod\\_modulo=405](https://anmlegis.datalegis.inf.br/action/TematicaAction.php?acao=abrirVinculos&cotematica=10060632&cod_menu=6783&cod_modulo=405) . Acesso em: 10 de mai. de 2023.

DUARTE, H. A. (2019). **Ferro - Um Elemento Químico Estratégico Que Permeia História, Economia E Sociedade.** *Química Nova*, 42(10), 1146–1153.

<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170443>

ENDO, I. **Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes**. 1997. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. 237.p. doi:10.11606/T.44.1997.tde-12112015-111453. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-12112015-111453/pt-br.php>. Acesso em: 10 de mai. de 2023.

ENDO I.; NALINI, Jr. H.A. 1992. Modelo da evolução cinemática do Sinclinal Alegria e adjacências, Quadrilátero Ferrífero- MG. **Rev. Esc. de Minas**, 45(1/2):24-27.

FERREIRA, L.A. **Escavação e exploração de minas a céu aberto**. TCC (Graduação) – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013. 112 f. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/engenhariacivil/files/2012/10/ESCAVA%c3%87%c3%83O-E-EXPLORA%c3%87%c3%83O-DE-MINAS-A-C%c3%89U-ABERTO.pdf>. Acesso em: 12. set. de 2023.

Ferreira, F. M. (2004). **Uma aplicação comparativa de métodos de avaliação das condições superficiais de estrada não-pavimentada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Transportes) – Universidade Estadual de Campinas, 222 f., Campinas.

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

KAULFMAN, W.W. **Mine Haulage Roads – A Manual**. U.S. Dept. of the Interior. United States. 1977.

Griebeler, N. P.; Pruski, F. F.; Silva, J. M. A. da; Ramos, M. M. e Silva, D. D. da (2005). Modelo para a determinação do espaçamento entre desaguadouros em estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n.2, Viçosa.

Griebeler, N. P. (2002). **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 121 f., Viçosa.

LAGOEIRO, L., ROMAMNO, R. 2000. Microstructures indicative of intracrystalline plasticity in microboudinaged quartz veins. **Revista Pesquisa & Pós-Graduação**, v.2(2),p.12-17,2000.

LIMA, H. M. R. **Concepção e Implementação de Sistema de Indicadores de**

**Desempenho em Empresas Construtoras de Empreendimentos Habitacionais de Baixa Renda.** 2005. 171 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

e do Sul, Porto Alegre, 2005.

LOPES, G. F. **Transição da mina a céu aberto para subterrânea no Morro da Mina.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012. 97 f. Disponível em: [https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFOP\\_afca54893d18d5ccd2cd2432b55c9409](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFOP_afca54893d18d5ccd2cd2432b55c9409). Acesso em: 16. set. de 2023.

MARIZ, J. L. V. **Análise da aderência à realidade brasileira dos métodos de previsão da taxa de produção em fases prematuras de projeto.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. 83 f. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/204071>. Acesso em: 15. ago. De 2023.

Masetti, L. S. S. de (2011). **Estudos de Dimensionamento Estrutural de Estradas de Mina a Céu Aberto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas, Ouro Preto. 157 f. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3283>. Acesso em: 12. mai. de 2023.

MELO, J.A.G.F. 2023. **AUMENTO DO TEOR DE FERRO DE PRODUTOS GRANULADOS POR MEIO DA REMOÇÃO DE MINERAIS DE GANGA POR TECNOLOGIA ORE SORTING**, p. 19. Dissertação de Mestrado. PPGEM. UFOP.

Oliveira, J. F. de; Griebeler, N. P.; Correchel, V. e Silva, V. C. da. (2009). **Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, supl. 0, Campina Grande.

PINTO, C. L.; DUTRA, J. I. G. **Introdução ao planejamento e operação de lavra (a céu aberto e subterrânea).** Belo Horizonte: Universidade Corporativa Chemtech, 2008. 57 f. Disponível em: <https://silo.tips/download/curso-introducao-ao-planejamento-e-operacao-de-lavra>. Acesso em: 10. De jun. De 2023.

RAMALHAO, Luciana. Minério de ferro: matéria-prima estratégica que permeia a história, economia e desenvolvimento da sociedade. **Mineração Brasil**, 25 out.2021. Disponível em:< <https://mineracaobrasil.com/minerio-de-ferro-materia-prima-estrategica>

que-permeia-a-historia-economia-e-desenvolvimento-da-sociedade/ >. Acesso em: 12 de mai. de 2023.

REIS, M. S. **Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra a céu aberto de minério de ferro dentro do Quadrilátero Ferrífero**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil. 2014. 132 f. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/4123>. Acesso em: 05. de set. de 2023.

RODOVALHO, E.C. **New approach for reduction of diesel consumption by comparing different mining haulage configurations**. Journal of Environmental Management. 177-185. 2016.

ROESER, H. M. Peter; ROESER, P.A. **O quadrilátero ferrífero – MG, Brasil: Aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas relacionados**. 2010. 5 f. - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SAMARCO MINERAÇÃO. **Plano de tráfego da mineração**. Autor: MAGALHÃES A.M. rev.2014; **Manual de operação de mina**. Autor: NEVES. T.C. rev.2016; **Padrão de acesso de mina**. Autor: COUTINHO H.L. rev.2016

SILVA, Valdir Costa e. **Curso min 112: Operações Mineiras**. Ouro Preto. 2011. (Apostila).

SILVA, N. C. S. **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incerteza para a obtenção de resultados operacionais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. 128 f.

SILVEIRA, S. M. B. et al. **Lavras de minas a céu aberto**. Porto Alegre: SAGAH, 2021.

SOUSA JÚNIOR, W.T. **Seleção de caminhões rodoviários para mineração utilizando a Metodologia de Auxílio Multicritério à Decisão. Estudo de caso: mineração de Bauxita**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil. 2012.

SOUSA, LILIAN et al. **Dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 2012. p 279-284.

TANNANT, D.D.; 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. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/277759950\\_Guidelines\\_for\\_Mine\\_Haul\\_Road\\_](https://www.researchgate.net/publication/277759950_Guidelines_for_Mine_Haul_Road_)

Design . Acesso em 24 jul. 2023.

THOMPSON, R. J.; Visser, A. T. **Designing and benchmarking mine roads for safe and efficient hauling.** In: DME open pit safety Workshop, 21 p., Witbank.

THOMPSON, R.J.; Visser, A. T. Mine haul road maintenance management systems. **The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, p. 303 – 312, South Africa.

Thompson, R. J.; Visser, A. T.; Smith R. A. F. and Fourie, G. A. (1997). **An investigation into the influence of haul road design, construction and maintenance practices on transport accidents.** SIMRAC Symposium, Safety in mines research advisory committee, 13 p., South Africa.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. **An Overview of the structural design of mine haulage roads.** The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. Pretoria, South Africa. p 29 – 37, 1996.

THOMPSON, R. J. **Mining Roads – Mine haul roads design, construction and maintenance management.** MIEAust PrEng. [2014]. Disponível em: [http://aspasa.co.za/wp-content/uploads/2017/07/road-design-and-maintanance- Molefe.compressed.pdf](http://aspasa.co.za/wp-content/uploads/2017/07/road-design-and-maintanance-Molefe.compressed.pdf) . Acesso em: 24 jul. 2023.

TRZASKOS, Barbara; ALKMIM, Fernando; ZAVAGLIA, Guilherme. Arcabouço estrutural e microestruturas do minério de ferro da jazida Casa de Pedra, Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Geociências**, Ouro Preto, v.41(3),p.486-497, Setembro, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjgeo/a/PR3NT59wpBFWHM5LcLkVG3B/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 23 de mai. De 2023.