



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



**NICOLE PINTO FERNANDES CAMINI MELO**

**PAVIMENTAÇÃO DE ACESSOS COM AGREGADOS PÉTREOS:  
ESTUDO DE CASO EM UMA MINERADORA DE GRANDE PORTE**

**OURO PRETO - MG**  
**2026**

**NICOLE PINTO FERNANDES CAMINI MELO**  
**nicole.melo@aluno.ufop.edu.br**

**PAVIMENTAÇÃO DE ACESSOS COM AGREGADOS PÉTREOS:  
ESTUDO DE CASO EM UMA MINERADORA DE GRANDE PORTE**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Minas.

**Professor orientador:** DSc. Hernani Mota de Lima

**Coorientadora:** Eng<sup>a</sup> Rayanne Silveira Canaã

**OURO PRETO – MG**  
**2026**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M528p Melo, Nicole Pinto Fernandes Camini.

Pavimentação de acessos com agregados pétreos [manuscrito]: estudo de caso em uma mineradora de grande porte. / Nicole Pinto Fernandes Camini Melo. - 2026.

64 f.: il.: color., gráf..

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.

Coorientadora: Rayanne Silveira Canaã.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Pavimentos. 2. Estradas - Manutenção e reparos. 3. Mineração a céu aberto. 4. Minérios de ferro. I. Lima, Hernani Mota de. II. Canaã, Rayanne Silveira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622(043)

Bibliotecário(a) Responsável: Michelle Karina Assunção Costa - CRB6/2164



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nicole Pinto Fernandes Camini Melo**

### **Pavimentação de acessos com agregados pétreos: Estudo de caso em uma mineradora de grande porte**

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 06 de março de 2026

#### Membros da banca

Dr. Hernani Mota de Lima - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. Henrique Nogueira Soares - (Tribunal de Justiça de Minas Gerais)  
Engenheiro de Minas - Bruno Anchieta Viana (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 09/03/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/03/2026, às 13:49, 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 **1071453** e o código CRC **4BE1D5AC**.

Aos meus pais e à minha irmã, pelo amor incondicional. Ao meu bem, por todo apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hernani, e à minha coorientadora, Eng<sup>a</sup> Rayanne, pela orientação precisa e pelo apoio, fundamentais para a realização deste trabalho.

À UFOP, ao DEMIN e à Escola de Minas, pela oportunidade de formação. Aos professores, pelo ensino de qualidade.

Aos meus pais, Rosimar e Tunico, e à minha irmã, Monique, pelo incentivo, pela paciência e por serem o meu porto seguro em todos os desafios da vida. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao meu amor, Jacu, por estar ao meu lado em todos os momentos, por toda a ajuda prática e pela base emocional que me deu forças para concluir esta etapa.

À Vó Tita, aos meus primos e tios, em especial à Carminha e ao Geraldo, por todo o apoio e carinho demonstrados ao longo dessa jornada.

À Ouro Preto e à República Sonhos, parte da minha história.

*"O que é a vida senão um ciclo infinito de querer, satisfazer, entediar-se e depois querer de novo?"*

- Inspirado em Arthur Schopenhauer

## RESUMO

A mineração a céu aberto depende da trafegabilidade contínua de suas vias operacionais. Contudo, no período chuvoso, a saturação hídrica do solo natural compromete a capacidade de suporte do corpo estradal, cenário que acarreta paralisações da frota de transporte e expressivas perdas de produtividade. Diante desse quadro, este trabalho possui o objetivo de analisar a eficácia da pavimentação de acessos com insumos agregados para a mitigação de processos erosivos e para a garantia da estabilidade mecânica da pista. A metodologia caracteriza-se como um estudo de caso técnico. A pesquisa baseou-se na aplicação do Método da Lacuna para o diagnóstico inicial de perdas e no monitoramento estrutural da via pós-intervenção. Os levantamentos apontaram um tempo médio histórico de recuperação de 38 minutos e 3 segundos, com a meta de retomada estabelecida em 35 minutos e 55 segundos. A definição das camadas estruturais dispensou o dimensionamento teórico por ensaios de resistência em virtude do elevado custo de implantação. Em substituição, o projeto adotou o referencial empírico de boas práticas de uma unidade vizinha. Assim, para suprir a deficiência geotécnica provocada pela falta de material interno competente, a equipe executou uma estrutura de blindagem de 0,73 metros de espessura com o uso de bloco, brita 03 e bica corrida. Devido à paralisação das atividades da unidade mineira, a aferição exata do tempo final de ciclo tornou-se temporariamente inviável. No entanto, as observações práticas confirmaram a eficácia da intervenção. A adequação geométrica e a pavimentação garantiram a preservação do acesso ao longo de todo o período chuvoso, com a redução dos processos erosivos. Em complemento, notou-se a diminuição imediata dos alarmes de torção nos caminhões fora de estrada. Conclui-se que a substituição do revestimento primário natural por agregados pétreos confere estabilidade à via e atua como escudo contra a infiltração hídrica. Essa prática corrobora a visão da infraestrutura viária como ativo produtivo essencial para a segurança e conservação dos equipamentos de transporte.

**Palavras-chave:** Mineração a céu aberto; Dimensionamento de pavimentos; Pavimentação com agregados pétreos; Manutenção preventiva de vias; Quadrilátero Ferrífero.

## ABSTRACT

Open-pit mining depends on the continuous trafficability of its operational roads. However, during the rainy season, water saturation of the natural soil compromises the bearing capacity of the road body, a scenario that causes transport fleet stoppages and significant productivity losses. Given this context, this study aims to analyze the effectiveness of access road paving with aggregate materials to mitigate erosive processes and to guarantee the mechanical stability of the track. The methodology consists of a technical case study. The research relied on the application of the Gap Method for the initial diagnosis of losses and on the structural monitoring of the road post-intervention. The assessments indicated a historical average recovery time of 38 minutes and 3 seconds, with a resumption goal set at 35 minutes and 55 seconds. The pavement definition bypassed theoretical design through resistance tests due to the high implementation cost. Instead, the project adopted the empirical benchmarking of a neighboring unit. Thus, to address the geotechnical deficiency caused by the lack of competent internal material, the team executed a 0.73-meter-thick armoring structure using block, crushed stone 03, and run-of-mine gravel. Due to the suspension of activities at the mining unit, the exact measurement of the final cycle time became temporarily unfeasible. Nevertheless, practical observations confirmed the effectiveness of the intervention. The geometric adaptation and paving guaranteed the preservation of the access throughout the entire rainy season, with a reduction in erosive processes. In addition, an immediate decrease in torsion alarms occurred on the off-highway trucks. The conclusion is that the replacement of the natural primary surfacing with stone aggregates provides stability to the road and acts as a shield against water infiltration. This practice corroborates the view of road infrastructure as an essential productive asset for the safety and conservation of transport equipment.

**Keywords:** Open-pit mining; Pavement design; Rock aggregate paving; Preventive road maintenance; Iron Quadrangle.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de causas e impactos das paradas operacionais.....	3
Figura 2 - Leira de proteção em via operacional .....	10
Figura 3 - Seção esquemática do pavimento de mina .....	13
Figura 4 - Caminhão fora de estrada Caterpillar 785 .....	25
Figura 5 - Degradação da via operacional e formação de lamaçal sob saturação hídrica .....	26
Figura 6 - Matriz de critérios de priorização para blindagem de acessos.....	28
Figura 7 - Seção transversal esquemática do pavimento .....	31
Figura 8 - Espalhamento da camada de blindagem com motoniveladora .....	33
Figura 9 - Acompanhamento físico da obra (Curva S) e impacto logístico .....	36
Figura 10 - Gráfico de barras do tempo médio de retomada pós-chuva.....	41
Figura 11 - Espalhamento das camadas de agregados pétreos .....	42
Figura 12 - Comparativo de avanço físico linear planejado versus realizado. ....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
ART	Análise de Risco da Tarefa
CBR	Índice de Suporte Califórnia ( <i>California Bearing Ratio</i> )
CV	Coefficiente de Variação
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
GPD	Gerenciamento Pelas Diretrizes
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
Ipea	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MME	Ministério de Minas e Energia
NR-22	Norma Regulamentadora nº 22
NRM	Norma Reguladora de Mineração
PIB	Produto Interno Bruto
PTS	Permissão de Trabalho
ROM	<i>Run Of Mine</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema .....	1
1.2	Justificativa .....	4
1.3	Objetivos .....	5
1.3.1	Geral .....	6
1.3.2	Específicos .....	6
1.4	Estrutura do Trabalho .....	6
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
2.1	Conceituação e Especificidades de Estradas de Mina .....	8
2.2	Normas de Segurança e Sinalização em Operações Mineiras .....	9
2.3	Logística de Suprimentos .....	11
2.4	Camadas Estruturais de um Pavimento Típico .....	12
2.5	Dimensionamento das Camadas .....	14
2.6	Índice de Suporte Califórnia .....	15
2.7	Sistemas de Drenagem de Vias Operacionais .....	15
2.8	Manutenção de Estradas .....	17
2.9	Gestão da Produção e Indicadores de Desempenho .....	18
2.9.1	Utilização Física e Indicadores de Produtividade .....	19
2.9.2	O Método da Lacuna no Gerenciamento pelas Diretrizes (GPD) .....	19
2.9.3	Curva S no Planejamento e Controle de Projetos .....	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>22</b>
3.1	Tipo de Pesquisa .....	22
3.2	Materiais e Métodos .....	23
3.2.1	Materiais e Equipamentos .....	23
3.2.2	Métodos e Procedimentos .....	23
3.3	Unidade de Análise e Caracterização do Cenário .....	24
3.4	Definição de Escopo e Critérios de Seleção .....	27
3.5	Protocolo de Coleta de Dados e Definição de Metas Operacionais .....	29
3.5.1	Dimensionamento Estrutural e Avaliação Geotécnica do Pavimento .....	30
3.5.2	Execução da Infraestrutura Viária .....	32
3.5.3	Protocolos de Controle Operacional e Gestão de Avanço Físico .....	34
3.6	Instrumento de Coleta de Dados .....	37

3.7	Tabulação dos Dados.....	38
3.8	Considerações Finais do Capítulo .....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>40</b>
4.1	Diagnóstico Operacional e Identificação da Lacuna .....	40
4.2	Justificativa Geotécnica e Dimensionamento Estrutural .....	41
4.3	Desafios Logísticos e Controle de Execução .....	43
4.4	Avaliação do Desempenho Pós-Intervenção .....	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>46</b>
5.1	Conclusão .....	46
5.2	Recomendações para trabalhos futuros .....	47
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Tannant e Regensburg (2001), as características funcionais das estradas de mina exercem influência determinante sobre o desempenho dos equipamentos, visto que a qualidade da pista dita a resistência ao rolamento e o consumo de combustível da frota. A eficiência operacional na mineração a céu aberto possui dependência direta da qualidade da infraestrutura logística (BALLOU, 2006). Nesse contexto produtivo, as estradas de lavra funcionam como os eixos principais para o escoamento da produção e a movimentação de estéril.

Todavia, sob condições climáticas adversas, essas vias tornam-se fator crítico de vulnerabilidade operacional. A pluviosidade compromete a capacidade de suporte do corpo estradal e impacta o desempenho do transporte, sobretudo quando os materiais *in situ* não garantem suporte adequado ao longo do ano (THOMPSON; PERONI; VISSER, 2019). Nesse contexto, o presente trabalho analisa essa interação e propõe soluções para estabilizar o ciclo produtivo.

### 1.1 Formulação do Problema

A mineração a céu aberto constitui um componente estruturante da economia global e apresenta, no cenário brasileiro, indicadores de elevada expressividade. De acordo com o estudo “A extensão da cadeia produtiva da economia mineral no PIB brasileiro”, lançado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) e o Ministério de Minas e Energia (MME), a cadeia produtiva da economia mineral nas últimas décadas variou entre 2,5% e 4% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Em valores, essa variação representou um montante estimado entre R\$ 150 bilhões e R\$ 340 bilhões em 2021.

Desse modo, garantir o retorno desse investimento depende de processos de carga e transporte pautados por alta previsibilidade e eficiência, especialmente devido à necessidade de otimização contínua do uso de ativos em ambientes operacionais exigentes. No contexto nacional, a região do Quadrilátero Ferrífero destaca-se pela intensa atividade extrativista e por um regime pluviométrico que impõe desafios recorrentes ao corpo estradal das unidades mineiras. Em decorrência dessa condição climática, a manutenção de acessos operacionais

assume papel determinante para evitar interrupções produtivas e assegurar a integridade física de equipamentos e colaboradores.

Na infraestrutura de mina, as estradas de lavra exercem papel estruturante para a continuidade do ciclo produtivo, pois condicionam o deslocamento seguro dos caminhões fora de estrada. Entretanto, durante os meses de maior pluviosidade, a saturação hídrica do solo natural reduz drasticamente a capacidade de suporte do corpo estradal. O padrão de manutenção das vias utilizava material primário proveniente do próprio plano de lavra. Contudo, a unidade apresenta uma baixa oferta de material *Run of Mine* (ROM) com boas características geotécnicas. Como resultado, as tentativas anteriores de reparo com esse insumo falharam em conter a degradação no período chuvoso.

Nesse contexto, essa vulnerabilidade corrobora as observações de Thompson, Peroni e Visser (2019), os quais alertam que os materiais *in situ* frequentemente falham em oferecer suporte adequado ao longo de todas as estações do ano, especialmente em regiões de intemperismo profundo. Consequentemente, surgem deformações que inviabilizam o tráfego e exigem paralisações frequentes para o restabelecimento das condições mínimas de segurança.

Diante desse cenário, este trabalho se insere na área geral de engenharia de minas e gestão de operações e, de forma mais específica, na interface entre infraestrutura de estradas de mina, gestão da produtividade da frota e controle de perdas operacionais durante o período chuvoso. A área de atuação concentra-se na avaliação de uma intervenção de infraestrutura, ou seja, a aplicação de insumos agregados para pavimentação de acessos operacionais com blindagem. Essa prática atua como alternativa para estabilizar a trafegabilidade, mitigar processos erosivos e reduzir os alarmes de torção nos equipamentos após elevado índice de pluviosidade.

Em termos problemáticos, o núcleo desta pesquisa reside no comprometimento das estradas de lavra durante o período chuvoso, quando a saturação hídrica acelera a degradação de trechos com revestimento primário preexistente em estágio avançado de exaurimento, situação que prejudica a drenagem e gera anomalias que comprometem a trafegabilidade. Por consequência, esse quadro provoca interrupções operacionais e ociosidade forçada de caminhões fora de estrada, o que afeta a utilização física da frota e a aderência ao plano de

produção. A complexidade deste cenário e a interdependência entre os fatores climáticos e operacionais encontram-se sintetizadas no fluxograma de causas e efeitos apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de causas e impactos das paradas operacionais.



Fonte: Autora (2026).

A Figura 1 ilustra a progressão física e logística do gargalo estudado. A análise do diagrama demonstra como a ausência de uma estrutura de pavimento adequada, em conjunto com o alto índice pluviométrico, desencadeia a falha na drenagem superficial da mina. Esse acúmulo hídrico anula a capacidade de suporte da pista e força a equipe de operação a acionar a paralisação preventiva da frota sob risco de acidentes. Esse cenário provoca o atraso direto da retomada operacional. Durante esse período, equipamentos de alto custo ficam inativos à espera da secagem ou do reparo da pista.

Conforme os registros operacionais analisados, o tempo médio de retomada pós-chuva corresponde a 38 minutos e 3 segundos, e tais paradas representam impacto médio acumulado de 3,06% nas perdas operacionais da unidade durante o período chuvoso.

Ao considerar o contexto e a inviabilidade do uso de materiais internos, tem-se a seguinte pergunta problema:

**Em que medida a pavimentação de acessos com insumos agregados externos pode garantir a estabilidade geométrica da via, mitigar processos erosivos e reduzir os alarmes de torção nos equipamentos durante o período chuvoso em uma operação de mineração a céu aberto no Quadrilátero Ferrífero?**

## **1.2 Justificativa**

A justificativa deste estudo fundamenta-se na relevância estratégica de reduzir custos operacionais e estabilizar a produção frente às interferências climáticas. A indisponibilidade de acessos interrompe o ciclo de transporte e compromete a produtividade geral. Nesse contexto, a evolução dos caminhões com elevadas capacidades de carga exige uma mudança de paradigma na gestão de infraestrutura. Conforme defendem Thompson, Peroni e Visser (2019), a via de transporte deve ser considerada um ativo produtivo, de forma idêntica aos veículos que nela trafegam. Assim, o investimento na blindagem viária integra-se obrigatoriamente ao sistema de gestão de ativos da operação.

Do ponto de vista prático-operacional, a blindagem de acessos com materiais agregados (bloco, brita 03 e bica corrida) é considerada uma intervenção com potencial de elevar a robustez do corpo estradal em condições adversas, o que reduz o tempo necessário para reestabelecer a trafegabilidade após eventos pluviométricos e diminui a ociosidade forçada da frota.

Para a manutenção da continuidade produtiva sob chuva, a unidade adota estoques estratégicos posicionados próximos à alimentação da usina e às frentes de lavra. Nesse contexto, a pavimentação estruturada atua de forma complementar para fortalecer essa logística. Quanto aos parâmetros de projeto, a viabilidade econômica exigiu adaptação técnica. O dimensionamento baseado no ensaio Índice de Suporte Califórnia (CBR) demandaria camadas excessivamente espessas e de custo proibitivo para a planta. Dessa

forma, a engenharia aplicou o referencial empírico de boas práticas de uma unidade vizinha da mesma empresa para a viabilização financeira da obra.

Quanto aos benefícios esperados, o trabalho justifica-se pela busca de uma melhoria mensurável, com a meta de atingir o tempo médio de retomada de 35 minutos e 55 segundos até o encerramento do ciclo chuvoso de 2025. Esse objetivo reforça o caráter aplicado da pesquisa e a sua aderência aos indicadores operacionais. Adicionalmente, a pista blindada passa a demandar apenas correções superficiais ágeis, com a redução drástica do retrabalho mecânico nas manutenções viárias.

Desse modo, o estudo agrega valor ao consolidar um diagnóstico objetivo das perdas vinculadas ao acesso e ao apoiar a tomada de decisão sobre novos investimentos em infraestrutura viária. Por conseguinte, a metodologia oferece uma validação embasada em dados operacionais e de telemetria, com elevado potencial de replicabilidade para outros trechos críticos da unidade.

Por fim, os fatores motivacionais para a escolha do tema decorrem da criticidade do período chuvoso para a continuidade operacional e da necessidade de maior confiabilidade no planejamento de lavra. O impacto das interrupções na produtividade da frota afeta diretamente a estabilidade do processo produtivo e a viabilidade econômica da mina. De acordo com Thompson, Peroni e Visser (2019), o desempenho inadequado de uma via prejudica imediatamente a relação custo-benefício, uma vez que até 50% dos custos totais da mineração a céu aberto advêm do transporte. Portanto, o investimento na blindagem viária traduz-se em redução direta do custo por tonelada transportada.

### **1.3 Objetivos**

A definição dos objetivos direciona a condução desta pesquisa para a validação técnica da proposta de intervenção na infraestrutura viária. Desse modo, a estruturação a seguir apresenta o escopo central do estudo e detalha as etapas intermediárias exigidas para a validação da estabilidade mecânica do pavimento e dos ganhos operacionais alcançados.

### **1.3.1 Geral**

Analisar a eficácia da aplicação de insumos agregados para pavimentação de acessos operacionais (blindagem) na preservação geométrica da via, na mitigação de processos erosivos e na redução dos alarmes de torção da frota de transporte, em uma operação de mineração a céu aberto no Quadrilátero Ferrífero.

### **1.3.2 Específicos**

- a) Diagnosticar o impacto pluviométrico na produtividade da mina por meio da quantificação histórica do tempo médio de retomada operacional.
- b) Dimensionar as camadas de blindagem a partir de um referencial empírico de boas práticas de uma unidade vizinha, em substituição ao ensaio CBR, para a viabilização econômica da obra.
- c) Controlar o avanço físico da obra de pavimentação através da ferramenta Curva S para a identificação de desvios entre o cronograma planejado e o executado.
- d) Validar a eficácia da intervenção estrutural mediante a constatação prática da eliminação de erosões e a redução de alertas mecânicos de torção nos caminhões fora de estrada.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

A organização deste trabalho compreende cinco capítulos estruturados para responder à questão central da pesquisa. Inicialmente, o primeiro capítulo dedica-se à contextualização do tema, com a apresentação do problema, da justificativa e dos objetivos propostos. Posteriormente, o segundo capítulo aborda a fundamentação teórica necessária, com ênfase nas especificidades de estradas de mina, no dimensionamento de pavimentos e nos indicadores de gestão da produtividade.

Na sequência, o terceiro capítulo detalha a metodologia aplicada, onde se descrevem os instrumentos de coleta, como a telemetria e a utilização do software Vero PGS como direcionador metodológico, além dos procedimentos de análise de dados. O quarto capítulo expõe os resultados obtidos e discute a eficácia técnica da blindagem nos acessos

operacionais. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões finais do estudo e sugere recomendações para trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A fundamentação teórica deste estudo baseia-se na análise de conceitos essenciais para a compreensão da infraestrutura viária em mineração. O capítulo aborda inicialmente as especificidades técnicas das estradas de mina, as normas de segurança e os critérios para o dimensionamento de pavimentos e drenagem. Na sequência, a discussão contempla a logística de suprimentos e as práticas de manutenção preventiva. Por fim, apresentam-se os modelos de gestão da produção e os indicadores de desempenho utilizados para o monitoramento da eficiência operacional.

### **2.1 Conceituação e Especificidades de Estradas de Mina**

No âmbito da mineração a céu aberto, as estradas são conceituadas como vias internas projetadas para suportar o tráfego de equipamentos pesados e veículos operacionais. Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998), sua função principal é conectar os pontos estratégicos da operação, como as frentes de lavra, as usinas de beneficiamento, as áreas de estocagem de produtos e as pilhas de disposição de estéril.

O planejamento de vias em mineração frequentemente adapta a legislação e as metodologias de projetos de rodovias para as condições operacionais específicas da mina. Desse modo, a estruturação do projeto costuma seguir o modelo de engenharia rodoviária do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006), que se divide em duas naturezas principais: o Projeto Básico de Engenharia, que define os elementos mínimos para a licitação da obra, e o Projeto Executivo de Engenharia, que detalha os métodos construtivos e todos os componentes necessários à completa execução dos trabalhos.

Segundo Pontes Filho (1998), o projeto geométrico é a etapa viária dedicada ao estudo aprofundado das características do traçado. Nesse contexto, essa análise fundamenta-se em variáveis como os princípios da cinemática, os parâmetros operacionais, o comportamento dos condutores e os requisitos de segurança. A atenção a esses fatores exige extremo rigor. Assim, Thompson, Peroni e Visser (2019) ressaltam que a ausência de padrões de projeto adequados impõe uma curva de aprendizado íngreme e perigosa para a operação. Sob essa lógica, a geometria da via constitui um fator rígido; logo, a correção tardia de falhas estruturais mostra-se inerentemente custosa e eleva a exposição ao risco de acidentes graves.

No contexto normativo, o projeto geométrico deve atender a requisitos legais e de segurança, especialmente os estabelecidos pela Norma Reguladora de Mineração (NRM) nº 13. Conforme previsto nesse instrumento regulatório, a norma exige um plano de trânsito que estabeleça regras de circulação, velocidades seguras e distâncias mínimas entre veículos. Além disso, define critérios determinantes, como a largura mínima das pistas, a aspersão de vias não pavimentadas para controle de poeira e a sinalização adequada para condições de visibilidade adversa (BRASIL, 2011).

## **2.2 Normas de Segurança e Sinalização em Operações Mineiras**

No que se refere à governança operacional, a gestão da infraestrutura viária na mineração a céu aberto é orientada por normas rigorosas que visam garantir a integridade física dos colaboradores e a disponibilidade operacional. Atendendo às exigências da Norma Regulamentadora nº 22 (NR-22), é indispensável que toda mina possua um plano de trânsito estruturado que determine as regras de preferência, distâncias de segurança e velocidades permitidas.

Além das diretrizes gerais, em áreas com risco de queda, a norma exige a construção de leiras de proteção com altura mínima equivalente a 50% do diâmetro do pneu do maior veículo em circulação. O plano exige a manutenção de plantas baixas atualizadas que identifiquem as vias, a sinalização estratégica e as áreas de recuo, de modo a garantir que as vias permaneçam desimpedidas e iluminadas. Para exemplificação prática, a materialização dessa exigência normativa em campo encontra-se na Figura 2.

Figura 2 - Leira de proteção em via operacional



Fonte: Autora (2025).

Na Figura 2, observa-se a conformidade da estrutura com o relevo local e a disposição do material granular que compõe a leira. Nota-se, ainda, a presença de sinalização por pontalete no topo do anteparo, cuja finalidade é demarcar a borda da estrada e o limite de lavra. Desse modo, o conjunto atua como um dispositivo de segurança essencial para a contenção de veículos em caso de desvios acidentais, pois oferece resistência física imediata e orientação visual clara na pista operacional.

Contudo, a execução de intervenções para o restabelecimento de condições seguras em ativos geotécnicos requer um rigoroso controle administrativo e técnico. Segundo as diretrizes do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), essas atividades dependem obrigatoriamente da emissão da Permissão de Trabalho (PTS) e da Análise de Risco da Tarefa (ART). Para assegurar a conformidade técnica, é fundamental que esses procedimentos contem com a

avaliação e aprovação obrigatória da equipe de Geotecnia, para que a manutenção da via não comprometa a estabilidade das estruturas adjacentes.

Acerca da sinalização de obras, a implementação de elementos de sinalização de obras em frentes de infraestrutura e recuperação viária é determinante para a neutralização de perigos operacionais. De acordo com os preceitos do DNIT, a área de influência de uma obra deve ser subdividida em perímetros específicos para orientar o fluxo veicular.

Primeiramente, a área de pré-sinalização adverte os condutores sobre as intervenções adiante. Na sequência, a área de transição direciona o fluxo para fora de sua trajetória normal de forma gradual. A execução ocorre na área de atividade, que compreende o setor de trabalho e a área de proteção, responsável por separar fisicamente o fluxo de usuários da movimentação de operários e equipamentos. Por fim, a área de retorno conduz o tráfego de volta às condições habituais de circulação.

Em situações específicas, para intervenções de curta duração ou situações de visibilidade reduzida, o uso de bandeiras sinalizadoras é uma estratégia eficaz para o controle do tráfego. Segundo as diretrizes do DNIT, este dispositivo é usado para alertar sobre interrupções de fluxo, especialmente em operações de pare e siga ou vias com alto volume de tráfego.

Dessa forma, o colaborador responsável pela sinalização deve posicionar-se de frente para o fluxo, em local visível e fora da zona de circulação, utilizando sinais precisos e uniformes. Além disso, em cenários que demandam a circulação alternada de veículos em uma mesma faixa de tráfego, recomenda-se a utilização do sinal de pare portátil, a fim de assegurar a alternância segura do direito de passagem durante a execução dos serviços de emergência.

### **2.3 Logística de Suprimentos**

A eficácia operacional em grandes empreendimentos depende diretamente da integração dos processos logísticos. Segundo Ballou (2006), o gerenciamento da cadeia de suprimentos ultrapassa a simples movimentação de materiais, pois compreende o planejamento estratégico e a execução coordenada de todas as etapas de fornecimento, aquisição e conversão. Essa visão pressupõe que a gestão logística não ocorre de forma

isolada, mas sim por meio de uma colaboração estreita entre os diversos membros do canal, com a inclusão de fornecedores, prestadores de serviço terceirizados e clientes finais.

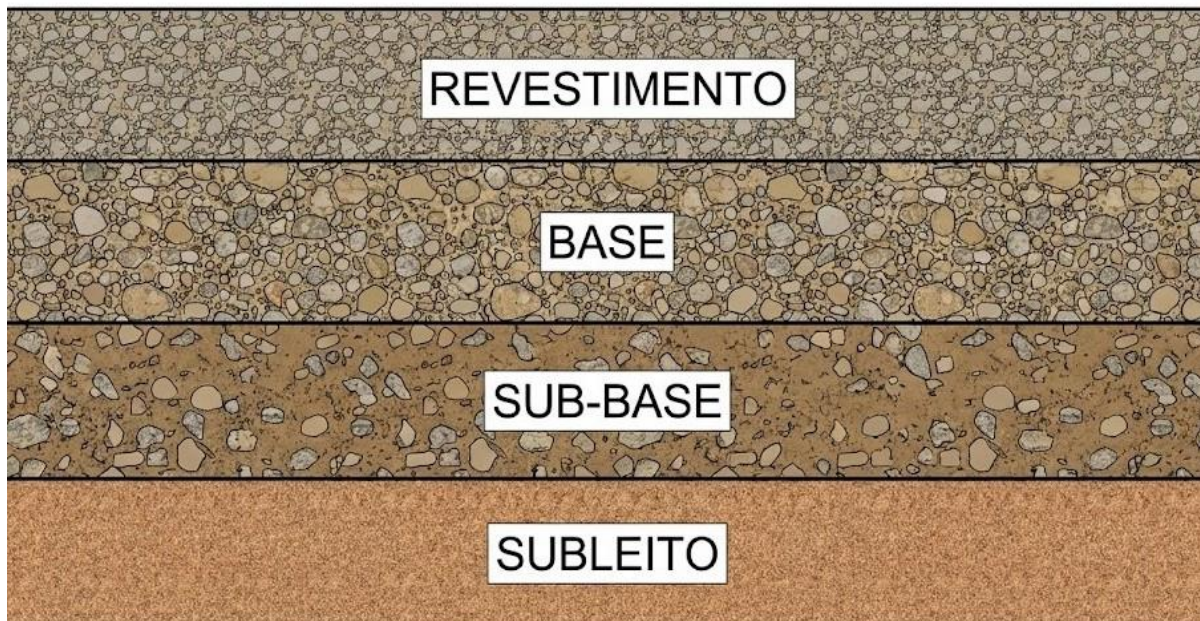
Dessa forma, a coordenação entre esses parceiros é o que garante o fluxo necessário para que as atividades de conversão e fornecimento atendam às demandas do projeto. Para Ballou (2006), a falta de uma sincronia efetiva na gestão dessas atividades e parcerias compromete a integridade do fluxo logístico e converte processos de aquisição em potenciais gargalos que inviabilizam a entrega de valor nos prazos e especificações esperados pela organização.

## **2.4 Camadas Estruturais de um Pavimento Típico**

O projeto de estradas para transporte de carga é concebido a partir de duas abordagens complementares: a estrutural e a funcional. A abordagem estrutural foca na capacidade da via de suportar as cargas solicitantes ao longo de sua vida útil sem demandar manutenção excessiva. Por sua vez, a abordagem funcional concentra-se na seleção do material da camada de rolamento, visando criar uma superfície segura, econômica e adequada para a circulação dos veículos. Ressalta-se que a manutenção é um aspecto diretamente ligado a ambas as dimensões do projeto, uma vez que as escolhas estruturais e funcionais determinam a frequência e a natureza das intervenções necessárias ao longo do tempo (HUGO, 2005).

Nesse contexto, os pavimentos são sistemas multicamadas com espessura e rigidez específicas para suportar as solicitações de tráfego e as condições climáticas locais. Essa configuração assegura o desempenho ao longo da vida de projeto (BERNUCCI et al., 2013). De modo geral, a estrutura divide-se em revestimento, base, sub-base e subleito, conforme esquematiza a Figura 3. A viabilidade econômica torna decisivo o uso de materiais geológicos da própria mina ou do seu entorno para a construção dessas camadas, contexto no qual o revestimento atua predominantemente como superfície de contato funcional e as demais assumem o papel estrutural.

Figura 3 - Seção esquemática do pavimento de mina



Fonte: Autora (2026).

A partir da observação do perfil transversal esquematizado na Figura 3, identifica-se na base do sistema o subleito, que atua como a fundação do pavimento. Essa camada, constituída pelo terreno natural *in situ* ou por solo e rocha compactados, é responsável por suportar a totalidade das cargas verticais transmitidas pelas camadas superiores.

Imediatamente acima do subleito, pode ser projetada a sub-base, uma camada de transição necessária sobre solos de baixa capacidade de suporte. Composta geralmente por material granular, essa estrutura exerce múltiplas funções: provê uma plataforma de drenagem, protege o subleito contra variações volumétricas, incrementa a capacidade estrutural do conjunto e distribui as tensões recebidas da camada superior.

Na sequência ascendente da estrutura, a base possui papel essencial e caracteriza-se por elevada densidade e estabilidade. Sob o ponto de vista mecânico, sua principal função consiste em dissipar as tensões concentradas aplicadas pelo tráfego e distribuí-las de maneira a não causar deformações excessivas ou permanentes nas camadas inferiores. Assim, uma base bem projetada torna-se fundamental para a estabilidade do pavimento, pois garante mobilidade, controle dos veículos e prevenção da deterioração precoce da via.

Dessa forma, o sistema consolida-se com o revestimento, a camada superficial que interage diretamente com o tráfego e o clima. Conforme apontam Thompson, Peroni e Visser (2019), essa camada de desgaste possui dupla função: proporciona condução segura e econômica e atua como escudo, com a finalidade de proteger a base subjacente contra a infiltração de água e o desgaste abrasivo dos pneus.

Diante disso, a seleção criteriosa desse material revela-se determinante para a durabilidade de todo o pavimento. A escolha do revestimento ideal exige o atendimento a critérios rigorosos, tais como trafegabilidade sob chuvas intensas e controle de poeira nos períodos secos. Além disso, essa adequação deve aliar-se ao baixo custo de implantação e à reduzida necessidade de manutenção.

## **2.5 Dimensionamento das Camadas**

A estruturação das camadas de base e sub-base em vias de mineração, na maioria das vezes, prioriza o uso de recursos granulares disponíveis nas proximidades da operação. No entanto, a estabilização físico-química desses insumos torna-se obrigatória quando o emprego de materiais *in natura* resulta em dimensionamentos com espessuras tecnicamente inaceitáveis ou quando o acesso a materiais de melhor desempenho é dificultado por restrições ambientais e elevados custos logísticos decorrentes de grandes distâncias de transporte (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

Acerca da caracterização dos materiais, a camada de base geralmente utiliza cascalho bruto, enquanto a sub-base é composta por areia, silte ou solo arenoso com propriedades de intertravamento. De acordo com Tannant e Regensburg (2001), a frequente falta de processos de britagem nesses agregados gera desafios para atingir uma distribuição granulométrica rigorosa. Por conseguinte, para garantir a homogeneidade e a integridade da estrutura, a dimensão máxima das partículas deve ser limitada a dois terços da espessura total da camada, sendo esse controle realizado através de peneiramento ou inspeção visual sistemática durante a execução.

## 2.6 Índice de Suporte Califórnia

O dimensionamento de pavimentos em estradas de mineração fundamenta-se, em grande parte, em metodologias empíricas de projeto. Entre as abordagens mais tradicionais e difundidas globalmente destaca-se o Índice de Suporte Califórnia, identificado pela sigla CBR (*California Bearing Ratio*) (TANNANT; REGENSBURG, 2001). Do ponto de vista técnico, o CBR atua como um parâmetro de avaliação da resistência de solos e materiais granulares ao combinar propriedades de coesão e ângulo de atrito. No cenário nacional, a norma DNIT 172/2016 estabelece os critérios para a execução deste ensaio (BERNUCCI et al., 2022).

A determinação deste índice, expressa em porcentagem, baseia-se na relação entre a pressão necessária para a penetração de um pistão padronizado em um corpo de prova e a pressão exigida para o mesmo procedimento em um material de referência. Contudo, o uso histórico do método CBR revela limitações severas na realidade operacional contemporânea. Tannant e Regensburg (2001) apontam que deficiências metodológicas induzem a projetos inadequados, circunstância que favorece o surgimento de estruturas subdimensionadas ou com custos de execução injustificadamente elevados.

Essa fragilidade técnica é corroborada por Thompson, Peroni e Visser (2019), os quais alertam que procedimentos empíricos baseados exclusivamente no CBR não garantem a composição estrutural mais eficaz perante as elevadas cargas por roda dos caminhões modernos. A proteção das camadas inferiores contra tensões verticais excessivas exige uma análise técnica rigorosa. Portanto, as operações que utilizam veículos de categoria ultragrande, a substituição de modelos empíricos por métodos baseados no módulo de resiliência dos materiais torna-se uma exigência para a integridade da via.

## 2.7 Sistemas de Drenagem de Vias Operacionais

A drenagem de uma estrada detém a função primordial de gerir o escoamento hídrico que atinge a estrutura do pavimento. Nesse sentido, o sistema visa a captação e a condução da água para locais que não comprometam a segurança operacional, a vida útil da via ou o meio ambiente. Para alcançar a eficiência ideal, a rede deve possuir capacidade para processar a precipitação máxima esperada e, conseqüentemente, minimizar empoçamentos, patologias e

a infiltração nas camadas de sub-base (HOLMAN, 2006). Nessa perspectiva, o DNIT (2006), estabelece que a finalidade central consiste em evitar variações significativas de umidade nos materiais do pavimento e do subleito, fator capaz de alterar o volume e a capacidade de suporte da estrutura ao longo do período de serviço.

Dessa forma, a gestão deficitária das águas pluviais acarreta severas consequências operacionais. A drenagem inadequada favorece a formação de lamaçais e depressões, o que resulta na perda de aderência dos pneus, na degradação acelerada da borracha por cortes e no aumento do consumo de combustível. Somado a isso, a água acumulada sobre a pista oculta perigos, como rochas pontiagudas, e atua como lubrificante, o que torna os pneus mais suscetíveis a avarias. Por esse motivo, o umedecimento excessivo para o controle de poeira é desaconselhável. O dano agrava-se no instante exato da infiltração no corpo estradal (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

Uma vez iniciada, a infiltração nas camadas internas desencadeia processos de deterioração críticos. Ocorre, conforme Tannant e Regensburg (2001), um decréscimo na capacidade de suporte do subleito em virtude da sua saturação, com possibilidade real de expansão volumétrica. Em paralelo, nota-se o fenômeno de bombeamento, caracterizado pela expulsão de partículas finas do subleito e das camadas granulares mediante a ação dinâmica do tráfego pesado sobre a água acumulada. Esse fluxo hídrico interno causa o arrastamento de materiais e gera processos erosivos capazes de comprometer a integridade de toda a via (DNIT, 2006).

Para viabilizar o escoamento hídrico, Tannant e Regensburg (2001) recomendam a execução de um abaulamento transversal na pista com declividade entre 2% e 4%. Essa geometria inteligente promove o escoamento rápido da água em direção às bermas de segurança, locais onde aberturas devidamente espaçadas devem permitir a saída definitiva do volume hídrico da plataforma.

Apesar da relevância do tema, as metodologias de dimensionamento para estradas não pavimentadas permanecem, por vezes, simplificadas. De acordo com Griebeler et al. (2005), as práticas convencionais limitam-se frequentemente à análise da declividade e da textura do solo, com a oferta de recomendações generalistas. No entanto, essa abordagem revela-se insuficiente por ignorar fatores hidrológicos e geotécnicos determinantes, como a vazão de

escoamento, as condições hidráulicas das canaletas e a suscetibilidade do solo à erosão. Logo, a integração destes fatores é imprescindível para a viabilidade técnica e a eficiência de um projeto de drenagem em operações mineiras.

## **2.8 Manutenção de Estradas**

A manutenção de uma estrada de mina não deve ser tratada como uma atividade emergencial. Esta prática é parte integrante do projeto e compõe o custo operacional total da via. De acordo com Tannant e Regensburg (2001), as principais atividades de manutenção diária consistem em um ciclo de umectação, nivelamento e compactação para a preservação do perfil geométrico adequado.

A supressão de poeira é uma atividade de manutenção essencial por razões de segurança e preservação de ativos. A poeira gerada pelo tráfego reduz a visibilidade a níveis perigosos e causa danos severos aos motores. Desse modo, a aplicação de água, principal método de controle, é benéfica principalmente em estações secas. Este procedimento controla a poeira e auxilia na manutenção da compactação e da resistência da camada superficial, fato que ameniza a formação de patologias como as ondulações (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

Fernandes (2019) salienta que a manutenção preventiva é caracterizada por intervenções programadas que possuem a finalidade de preservar a integridade do sistema antes que uma falha ocorra. Esse método apresenta um planejamento prévio que leva em consideração a mitigação do desgaste das vias, como a blindagem, visando reduzir a frequência de paralisações da operação. Ao priorizar a preservação do estado funcional da estrada minerária, a manutenção preventiva contribui para a estabilidade do processo produtivo e para a extensão da vida útil dos ativos.

Em contrapartida, a manutenção corretiva tem como objetivo principal restabelecer o sistema à sua condição de operação ideal somente após a ocorrência de uma anomalia que comprometa as atividades. Segundo Fernandes (2019), esse método é aplicado em situações nas quais as falhas não acarretam prejuízos fatais ou irreversíveis ao sistema como um todo. Por se tratar de uma falha inesperada, a manutenção corretiva exige uma intervenção imediata

de reparo para solucionar o problema, como o patrolamento de lama, diferenciando-se da prática preventiva por não possuir a previsibilidade dentro do fluxo de trabalho planejado pela organização.

Estradas irregulares elevam a resistência ao rolamento e exigem potência extra, com consequente aumento do consumo e desgaste da frota. Conforme Thompson, Peroni e Visser (2019), em uma rampa com inclinação de 8% a 10% e resistência básica de 2%, o acréscimo de 1% na resistência reduz a velocidade do caminhão entre 8% e 11%. Somado a isso, os mesmos autores apontam que esse incremento de 1% na resistência, acima do caso base, eleva o consumo de combustível em 25% em estradas planas e em 5% nas vias com rampa de acesso. De acordo com Tannant e Regensburg (2001), a exclusão desses custos das análises econômicas motiva decisões baseadas em estimativas empíricas. Contudo, os autores recomendam a inclusão desse custo real na análise através de um acréscimo percentual nos custos operacionais veiculares.

A análise comparativa entre os tipos de manutenção do pavimento evidencia a viabilidade econômica superior da abordagem preventiva. Fernandes (2019) sustenta que essa superioridade baseia-se na mitigação do desgaste prematuro e na consequente queda da frequência de falhas críticas. Essa visão converge com os dados de Thompson, Peroni e Visser (2019), os quais alertam que a recuperação de uma via deteriorada pode demandar até 500% mais tempo que a construção original. Dessa forma, a manutenção preventiva garante a continuidade operacional, a preservação estrutural da pista e a proteção da frota.

## **2.9 Gestão da Produção e Indicadores de Desempenho**

No contexto da mineração, a qualidade da infraestrutura viária vai além da condição visual das pistas. Segundo Thompson, Peroni e Visser (2019), uma via eficiente deve minimizar o custo operacional total. Essa premissa abrange de maneira única os gastos com a frota de transporte e as despesas com a manutenção da própria estrada. Além disso, a gestão exige a adoção de indicadores precisos para quantificar perdas operacionais e justificar a aplicação de materiais agregados. Assim, o alinhamento das intervenções viárias às metas da companhia requer métodos analíticos eficientes, além de ferramentas de controle físico das

obras, a exemplo da Curva S (BRASIL, 2023). Os próximos tópicos detalham as métricas de utilização da frota e a aplicação do método de lacunas operacionais.

### **2.9.1 Utilização Física e Indicadores de Produtividade**

A gestão da eficiência em operações de mineração vincula-se diretamente à capacidade de maximizar a produtividade dos ativos de transporte. Dessa forma, Vasconcelos et al. (2021) definem a utilização física como o período em que o equipamento permanece em operação efetiva. Esse indicador sofre o impacto imediato de interrupções no fluxo de trabalho. Logo, a análise atenta desses fatores permite a identificação das causas de ociosidade para a garantia da continuidade do processo.

Vale ressaltar que, assim, o apontamento de horas inativas por perda de condição de acesso desponta como um dos maiores entraves para o cumprimento das metas. Essa paralisação acontece quando as vias internas perdem a estabilidade e a segurança para o tráfego regular. Portanto, eventos climáticos atuam como os principais responsáveis pela degradação da superfície das estradas. Como consequência, a frota permanece inoperante até a recuperação total da pista.

A paralisação forçada dos equipamentos eleva os tempos de ciclo e encarece os custos operacionais unitários. Esse cenário agrava a queda da utilização física global da mina. Nesse sentido, a intervenção técnica na infraestrutura de pavimentação é fundamental. A medida atua na redução da vulnerabilidade da operação aos meses críticos de precipitação pluviométrica.

### **2.9.2 O Método da Lacuna no Gerenciamento pelas Diretrizes (GPD)**

O Gerenciamento pelas Diretrizes (GPD), sob a ótica de Turrioni e Costa Neto (1995), vincula a sobrevivência da organização à prática do controle de qualidade em todos os níveis. Nesse sentido, o modelo exige a coleta e a análise de fatos para a definição de prioridades técnicas. O objetivo central consiste na aplicação de métodos que acelerem o alcance das

políticas da empresa. Dessa maneira, a identificação de lacunas operacionais marca o início desse processo de alinhamento estratégico.

A lacuna operacional caracteriza-se pela diferença exata entre o desempenho atual e o potencial máximo histórico de um ativo. Nessa perspectiva, o mapeamento dessa falta de direcionamento possibilita a correção de falhas e o cumprimento das metas estabelecidas. O GPD propõe que o planejamento tático possua fundamentação precisa em observações reais do ambiente de mina. Com isso, o ciclo de melhoria contínua transforma o aprendizado em evolução constante do processo produtivo.

O referencial teórico adverte que a simples fixação de metas numéricas perde a eficácia sem o desdobramento claro dos métodos de execução. Nesse contexto, o fechamento da lacuna exige o registro e a padronização das rotinas gerenciais. Essa cautela evita que a busca isolada por resultados ignore a estabilização prévia do processo. Logo, a estruturação antecedente assegura a previsibilidade necessária para a operação de transporte.

### **2.9.3 Curva S no Planejamento e Controle de Projetos**

A Curva S, de acordo com Zoppa (2016), é a representação gráfica de valores acumulados essencial para a gestão de projetos. O eixo horizontal marca a passagem do tempo, enquanto o vertical indica o progresso medido. A partir disso, a ferramenta permite a identificação do avanço físico, expresso em percentagem, ou financeiro. Assim, a trajetória do gráfico varia de acordo com o comportamento do fenômeno que se pretende representar no cronograma de obras.

A utilidade estratégica dessa técnica reside no acompanhamento via comparação com a linha de base aprovada (ZOPPA, 2016). Na prática, após a definição desse referencial, o gestor calcula os avanços estimados para projetar os valores planejados. Após isso, durante a fase de execução, medições periódicas revelam o progresso real. Desse modo, esses dados são inseridos no mesmo gráfico para uma visualização imediata da situação do empreendimento.

Por conseguinte, essa análise comparativa fornece uma indicação precisa sobre a evolução das atividades de campo. Assim, o método facilita a descoberta de desvios no

cronograma físico-financeiro. Com essa informação em mãos, a equipe técnica consegue tomar ações corretivas com agilidade. Portanto, o foco principal do controle é manter a aderência total ao plano original da obra de pavimentação.

### **3 METODOLOGIA**

Este capítulo descreve o percurso metodológico adotado para validar a blindagem de acessos como solução para a instabilidade operacional em períodos chuvosos. A estrutura da seção detalha inicialmente a classificação da pesquisa quanto aos seus fins e meios, seguida pela descrição dos materiais, equipamentos e ferramentas de engenharia, como a telemetria e a adoção do software Vero PGS como direcionador metodológico. Na sequência, são apresentados os procedimentos específicos de coleta de dados, a definição das variáveis e indicadores de desempenho, bem como as técnicas estatísticas utilizadas para a tabulação e análise dos resultados que fundamentam este estudo de caso.

#### **3.1 Tipo de Pesquisa**

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, visto que apresenta o objetivo de gerar conhecimentos voltados à solução de problemas específicos no ambiente operacional de mineração. A abordagem do trabalho é classificada como quantitativa, pautada na coleta de dados cronometrados e na análise estatística de séries para a validação dos resultados. O procedimento adotado define-se como um estudo de caso descritivo-exploratório. Segundo a literatura de Turrioni e Costa Neto (1995), essa estratégia permite analisar profundamente as paradas por retomada pós-chuva, uma vez que esse evento integra a visão estratégica organizacional à prática do controle de qualidade.

Embora o trabalho esteja inserido na sistemática do GPD, a metodologia de formulação da meta técnica concentrou-se no Método da Lacuna. A escolha desse método justifica-se pela necessidade de confrontar o desempenho realizado nos períodos críticos de novembro e dezembro de 2024 (médias superiores a 40 minutos) com o patamar de excelência histórica da operação (1º trimestre de 2024). Dessa forma, a pesquisa utiliza a identificação dessa lacuna de desempenho (desvio aproximado de 5 minutos) para orientar o desdobramento dos meios técnicos, representados pela implantação da pavimentação estruturada nos trechos de maior criticidade operacional.

## 3.2 Materiais e Métodos

Esta seção apresenta a descrição detalhada dos recursos físicos e dos protocolos técnicos adotados para a solução da problemática operacional. A trajetória metodológica fundamenta-se na coleta de dados cronometrados e na aplicação de parâmetros de engenharia de infraestrutura para a otimização da produtividade da frota.

### 3.2.1 Materiais e Equipamentos

Os ativos e insumos utilizados na realização deste estudo de caso são essenciais para a integridade da estrutura viária e para a acurácia da análise de desempenho:

- **Frota de Transporte:** A unidade de análise dispõe de caminhões fora de estrada da marca Caterpillar, modelos 777 e 785.
- **Insumos Agregados:** A estrutura de blindagem é composta pela sobreposição de camadas de bloco (0,35 m), brita 03 (0,20 m) e bica corrida (0,18 m).
- **Sistemas de Monitoramento:** Emprego do sistema de despacho da mina para o acompanhamento em tempo real e de telemetria embarcada para o registro automatizado dos ciclos de transporte.
- **Software de Engenharia:** Utilização do software Vero PGS como direcionador metodológico para o projeto.
- **Ferramentas de Suporte:** Uso de tratores de esteira para o espalhamento inicial e conformação, motoniveladoras para o acabamento do material fino e rolos compactadores de aproximadamente 20 toneladas, em conjunto com o peso do próprio trator, para a compactação das vias.

### 3.2.2 Métodos e Procedimentos

Os procedimentos descritos a seguir orientam a resolução do problema central por meio da análise de fatos e dados técnicos:

- **Dimensionamento Estrutural:** A definição das camadas de blindagem ocorreu mediante o referencial empírico de boas práticas de uma unidade vizinha da mesma empresa. Essa adoção substituiu o dimensionamento teórico por ensaios de resistência para a viabilização econômica do projeto.
- **Definição da Meta Operacional:** Estabelecimento do valor referencial de 35 minutos e 55 segundos por meio da média aritmética simples dos tempos de retomada registrados em nove meses do ciclo chuvoso (janeiro a março de 2024 e outubro de 2024 a março de 2025).
- **Protocolo de Coleta de Dados:** Monitoramento da trajetória de status no sistema de despacho, com o cálculo do tempo transcorrido entre o início do impedimento climático e o retorno efetivo do equipamento ao ciclo produtivo.
- **Purificação da Base de Dados:** Aplicação de filtros para o isolamento de paradas motivadas estritamente por neblina ou por falhas mecânicas, o que assegura que os resultados reflitam apenas a trafegabilidade do pavimento.
- **Controle de Execução:** Monitoramento do avanço físico do projeto via curva S, com a comparação volumétrica entre as toneladas de agregados planejadas e o total efetivamente aplicado.
- **Segurança Operacional:** Delimitação de perímetros de sinalização estratégica e construção de leiras de segurança com altura mínima de 50% do diâmetro do pneu do maior veículo.

### 3.3 Unidade de Análise e Caracterização do Cenário

A unidade de análise deste estudo abrange uma operação minerária de grande porte localizada na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Em conformidade com protocolos de sigilo comercial, a identificação da unidade é omitida, com ênfase nas características técnicas da frota e da infraestrutura viária local.

O transporte de material ocorre por meio de caminhões fora de estrada da marca Caterpillar, de forma específica os modelos 777 e 785. Estes veículos configuram a frota padrão da unidade para a manutenção da uniformidade operacional e da produtividade. A

carga movimentada por esses ativos corresponde à capacidade nominal máxima de cada equipamento. Para a compreensão visual da magnitude dessas solicitações mecânicas sobre o solo, a Figura 4 exhibe o modelo 785 em operação, classificado como o equipamento de maior porte do local.

Figura 4 - Caminhão fora de estrada Caterpillar 785



Fonte: Caterpillar (2026).

A partir da observação da estrutura do veículo exposto na Figura 4, nota-se a dimensão expressiva do rodado e a robustez do chassi, elementos projetados para o transporte de dezenas de toneladas de material geológico a cada ciclo. A transferência dessa carga elevada ocorre por meio de uma área de contato restrita entre os pneus e a pista. Em condições de umidade controlada, o terreno natural suporta o tráfego.

Sob a ótica operacional, o regime pluviométrico exerce influência drástica sobre esse cenário produtivo. Os dados de monitoramento coletados entre janeiro e março de 2024 e

outubro de 2024 a março de 2025 confirmam que a chuva atua como o principal agente de degradação da infraestrutura. O diagnóstico técnico evidencia que a saturação hídrica do subleito acarreta a perda imediata da capacidade de suporte do corpo estradal perante as cargas dos caminhões. Dessa maneira, a ausência de camadas granulares estruturadas favorece o surgimento de deformações plásticas e patologias pavimentares severas, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 - Degradação da via operacional e formação de lamaçal sob saturação hídrica



Fonte: Autora (2025).

A Figura 5, registrada em janeiro de 2025 durante o período chuvoso anterior à execução da blindagem, materializa o diagnóstico técnico de campo. A partir da observação visual, nota-se a formação de trilhas de roda profundas e a retenção de água na superfície de

rolamento. Esse estado físico comprova a completa incapacidade do solo natural em dissipar as tensões dos equipamentos pesados sob condições de umidade extrema.

Nessa conjuntura, a instabilidade na superfície de rolamento inviabiliza o tráfego seguro e eficiente da frota pesada, fato que demanda a interrupção das atividades. Vale ressaltar que a paralisação não depende de um índice pluviométrico fixo medido em milímetros, mas de critérios objetivos de segurança e trafegabilidade prática. O acionamento do gatilho operacional ocorre quando as condições ambientais prejudicam a visibilidade do operador ou quando o pavimento apresenta saturação excessiva por anomalias hídricas.

No que diz respeito às paradas operacionais, estas anomalias incluem o acúmulo superficial de águas pluviais e a saturação do material de desgaste, conforme as normas de segurança vigentes. Esses fatores resultam na queda da utilização física da frota, período no qual os ativos permanecem em estado de ociosidade forçada. Durante esse intervalo, os equipamentos aguardam o condicionamento dos acessos para o pleno retorno às atividades produtivas. Assim, essa condição evidencia a extrema vulnerabilidade da operação aos eventos climáticos intensos.

Diante desse cenário, o impacto acumulado dessas paradas atinge o patamar de 3,06% das perdas operacionais totais da unidade. Esse gargalo técnico gera um tempo médio de retomada de 38 minutos e 3 segundos até o pleno restabelecimento das atividades em segurança. A análise detalhada desses indicadores fundamenta a necessidade de intervenções estruturantes, como a pavimentação de trechos críticos com agregados pétreos, para assegurar a continuidade do processo produtivo. Em complemento, a unidade adota o posicionamento de estoques estratégicos próximos à alimentação da usina e às frentes de lavra. A blindagem da via atua, portanto, para fortalecer essa estratégia logística durante os meses de chuva.

### **3.4 Definição de Escopo e Critérios de Seleção**

A viabilidade técnica e econômica da intervenção exige um foco estratégico na malha viária da unidade, visto que a pavimentação de toda a extensão é impraticável sob o ponto de vista financeiro. Dessa forma, este estudo delimitou a aplicação da blindagem a 19% dos acessos operacionais totais, medida que corresponde a um trecho de mais de 30 quilômetros

de extensão. A seleção desses pontos seguiu uma matriz de decisão fundamentada em seis pilares técnicos, os quais permitem identificar de forma precisa as áreas onde a saturação hídrica gera maior prejuízo ao plano de lavra, conforme apresenta a Figura 6.

Figura 6 - Matriz de critérios de priorização para blindagem de acessos



Fonte: Autora (2026).

A análise da Figura 6 detalha a hierarquia adotada para a composição do escopo. O processo de priorização inicia-se pela análise da criticidade operacional das vias. Nesse estágio, os acessos que conectam frentes de lavra ativas ou essenciais para o escoamento recebem atenção imediata sob a justificativa de impacto direto no cumprimento das metas de produção. A estratégia visa garantir a fluidez nos trechos estratégicos da mina, locais onde qualquer interrupção compromete o volume de minério movimentado no dia.

Em um segundo nível de análise, a metodologia cruza o histórico de recorrência de paradas pós-chuva com as condições geotécnicas locais e a eficiência da drenagem superficial. Esse procedimento isola os locais com solo natural de baixa capacidade de suporte e altos

índices de deformação. Por fim, a matriz avalia a proximidade de jazidas de agregados competentes e a capacidade de manutenção da via pela frota de apoio. Trechos que exigem intervenções constantes para a correção de anomalias hídricas recebem prioridade para a pavimentação definitiva, fato que eleva a disponibilidade física dos acessos e reduz a ociosidade da frota de carga e transporte.

### **3.5 Protocolo de Coleta de Dados e Definição de Metas Operacionais**

Inicialmente, o processo de captura de dados operacionais fundamenta-se na precisão da telemetria instalada nos caminhões fora de estrada. Esse sistema eletrônico assegura o registro automatizado dos instantes precisos de operação e das interrupções de fluxo. Assim, esse mecanismo elimina erros inerentes à medição manual e preserva a integridade das séries temporais de cada ativo da frota.

A transmissão de informações em tempo real constitui a base para a análise rigorosa dos indicadores de utilização física e de produtividade. De maneira complementar, a comunicação via rádio exerce um papel fundamental na qualificação das paradas registradas pelo sistema eletrônico. Em termos práticos, enquanto a telemetria fornece o dado temporal exato, o rádio permite a distinção das causas específicas para cada evento de inatividade.

Diante disso, os operadores do centro de controle de despacho recebem as justificativas diretamente dos condutores para a atualização imediata dos códigos. Essa integração entre automação e relato operacional garante que o banco de dados reflita com fidelidade a realidade das frentes de lavra. Portanto, o monitoramento dos intervalos de retomada baseia-se na integração dessas duas fontes de informação.

O processo detalhado possibilita o isolamento preciso do tempo em que a frota permanece paralisada devido ao mau tempo climático. A acurácia desse banco de dados viabiliza o cálculo da média aritmética necessária para a definição da meta operacional de 35 minutos e 55 segundos. Desse modo, a metodologia assegura que o diagnóstico do gargalo produtivo possua plena sustentação técnica e científica.

A estipulação da meta de desempenho no período chuvoso fundamenta-se no valor referencial obtido pela média simples dos tempos de retomada. Vale ressaltar que o intervalo de análise compreende pelos meses de janeiro a março de 2024 e outubro de 2024 a março de 2025. Esse patamar representa o potencial produtivo da unidade sob condições climáticas sazonais e funciona como o padrão de excelência para a operação. A análise da variabilidade dos dados históricos fundamenta a consistência dessa meta e remove o caráter arbitrário do alvo estabelecido.

Nesse contexto, a cronometragem apresenta um desvio padrão de 4 minutos 34 segundos, o que indica uma baixa oscilação dos valores em torno da média calculada. Somado a isso, o Coeficiente de Variação (CV) situa-se no patamar de 12,72%. Sob o rigor estatístico, um CV inferior a 15% qualifica os dados como homogêneos e o processo como estável. De fato, essa métrica confere alta consistência à operação e legitima a aplicabilidade da meta proposta para o ciclo de pavimentação. A partir dessa fundamentação, a aplicação do Método da Lacuna ocorre mediante o confronto entre desempenhos distintos.

Dessa forma, a análise compara o desempenho observado nos meses de maior severidade pluviométrica, como novembro e dezembro de 2024, com o potencial de 35 minutos e 55 segundos. Nota-se que, nos períodos críticos citados, as médias de retomada superam a marca de 40 minutos. Como reflexo, a diferença resultante identifica a lacuna técnica de aproximadamente 5 minutos, que define o desvio de eficiência operacional da mina.

Por fim, o projeto de implantação da pavimentação estruturada visa a eliminação completa desse desvio identificado. A busca pelo fechamento desse vazio de eficiência foca na estabilização do processo produtivo através do ciclo de melhoria contínua. Desse modo, a infraestrutura atua como o meio técnico necessário para o alcance dos resultados estratégicos planejados para a unidade.

### **3.5.1 Dimensionamento Estrutural e Avaliação Geotécnica do Pavimento**

A caracterização da resistência do solo natural e o dimensionamento estrutural dispensaram a execução de ensaios teóricos, como o Índice de Suporte Califórnia (CBR). A adoção de parâmetros puramente teóricos resultaria em camadas estruturais excessivamente

espessas, fator que inviabilizaria o custo de implantação do projeto. Por isso, a engenharia adotou o referencial empírico de boas práticas de uma unidade vizinha pertencente à mesma empresa.

Essa escolha metodológica garantiu a viabilidade financeira e priorizou a prontidão na tomada de decisão operacional. O controle da qualidade dos materiais ocorre por meio de inspeção visual sistemática e pela seleção rigorosa da granulometria máxima dos agregados adquiridos de fornecedores externos. Esse monitoramento contínuo assegura que o solo de fundação possua a estabilidade necessária para o suporte das camadas granulares superiores.

Quanto ao dimensionamento estrutural, o pavimento possui projeto específico para suportar os esforços mecânicos dos caminhões fora de estrada modelos 777 e 785. A estrutura de blindagem apresenta uma sobreposição de materiais agregados com funções técnicas de distribuição de carga e proteção contra a infiltração hídrica. A espessura total da estrutura atinge 0,73 m, dimensão que garante uma base robusta para o tráfego pesado, conforme detalha a Figura 7.

Figura 7 - Seção transversal esquemática do pavimento



Fonte: Autora (2026).

A partir da análise visual da seção na Figura 7, nota-se que a sub-base consiste em um estrato de 0,35 m de bloco, material que atua como fundação principal sobre o subleito. Imediatamente acima, ocorre a aplicação de uma base de 0,20 m de brita 03, componente responsável pela dissipação das tensões verticais incidentes. Cada nível desempenha um papel fundamental na preservação da integridade do corpo estradal perante as solicitações de carga da frota.

Por fim, a superfície de desgaste apresenta execução com 0,18 m de bica corrida. A finalidade dessa camada superficial é promover a tração dos pneus e selar a estrutura contra o escoamento superficial. Além da resistência mecânica, o dimensionamento foca na eficiência da drenagem, exigência que demanda a manutenção de uma declividade transversal adequada. Esse cuidado técnico evita a saturação precoce das camadas e o acúmulo de águas pluviais no leito da via.

### **3.5.2 Execução da Infraestrutura Viária**

Para garantir a aderência ao plano de lavra, a execução das vias adota um fluxo operativo otimizado, com o intuito de conferir agilidade ao atendimento às frentes de trabalho. A modelagem geométrica conta com o suporte do software Vero PGS apenas como um direcionador metodológico. Na prática, a aplicação integral dessa ferramenta tornou-se inexecutável, fator que exigiu ajustes de campo para a viabilização do custo de implantação perante a escassez de material interno de forro.

Na etapa construtiva, o espalhamento e a conformação inicial do material ocorrem com o emprego de tratores de esteira. Em seguida, a motoniveladora atua no acabamento da fração fina e no nivelamento da via. A dinâmica dessa fase de conformação geométrica e espalhamento da camada de blindagem na pista encontra-se retratada na Figura 8.

Figura 8 - Espalhamento da camada de blindagem com motoniveladora



Fonte: Autora (2025).

A partir da observação da atividade em campo apresentada na Figura 8, nota-se a atuação do equipamento na distribuição homogênea dos agregados sobre a camada de base previamente consolidada. Para a garantia da densidade e estabilidade dessa estrutura recém-conformada, a equipe promove a compactação com o próprio peso do trator somado à ação de um rolo compactador de aproximadamente 20 toneladas. A infraestrutura foca na eficácia da forração com o objetivo de elevar a resistência ao tráfego pesado. Ressalta-se que a drenagem possui gestão prioritária por meio de declividades transversais e longitudinais construídas durante essa etapa, sem a previsão de estruturas auxiliares como canaletas.

Em relação à logística de suprimentos, a viabilidade da intervenção depende da integração para o fornecimento de agregados oriundos de fornecedores externos. Essa necessidade decorre da complexidade para a obtenção de materiais adequados dentro do próprio sítio minerário. Dessa forma, a análise do fluxo revelou que o processo de contratação constituiu um gargalo estratégico para o andamento do projeto.

A distância entre os estoques e a frente de obra apresenta variações conforme a disponibilidade local de praças. Em situações específicas, a equipe opta por receber o insumo diretamente dos fornecedores no ponto exato de aplicação, estratégia que reduz os deslocamentos internos da frota de apoio. Essa restrição logística acarretou um atraso significativo na entrega técnica (*handover*) para a equipe de execução. A previsão original indicava a liberação de insumos para o mês de junho de 2025. Contudo, o recebimento efetivo na mina ocorreu apenas ao final de julho do mesmo ano, fato que alterou o planejamento inicial e impactou o cronograma.

Por consequência, a demora no suprimento de materiais comprometeu a janela de trabalho em condições climáticas favoráveis. Este cenário contribuiu para a redução da aderência ao cronograma físico e evidenciou a sensibilidade do projeto às etapas administrativas. A estabilidade produtiva pretendida, portanto, atrela-se de modo direto à eficiência da cadeia de suprimentos mobilizada para a obra.

### **3.5.3 Protocolos de Controle Operacional e Gestão de Avanço Físico**

Durante a execução de intervenções em vias ativas, o controle de tráfego possui o rigor necessário para a neutralização de perigos operacionais e para a garantia da segurança dos usuários. A área de influência da obra recebe a delimitação por perímetros de sinalização estratégica, em total conformidade com as diretrizes da fundamentação teórica.

Conforme a criticidade da via, a intervenção aplica o sistema de pare e siga em meia pista, com a preservação de uma largura segura para o tráfego. Além disso, a equipe realiza o bloqueio total temporário do trecho para o alcance de maior eficiência executiva. No quesito comunicação, o contato ocorre essencialmente via rádio entre a equipe de infraestrutura e a

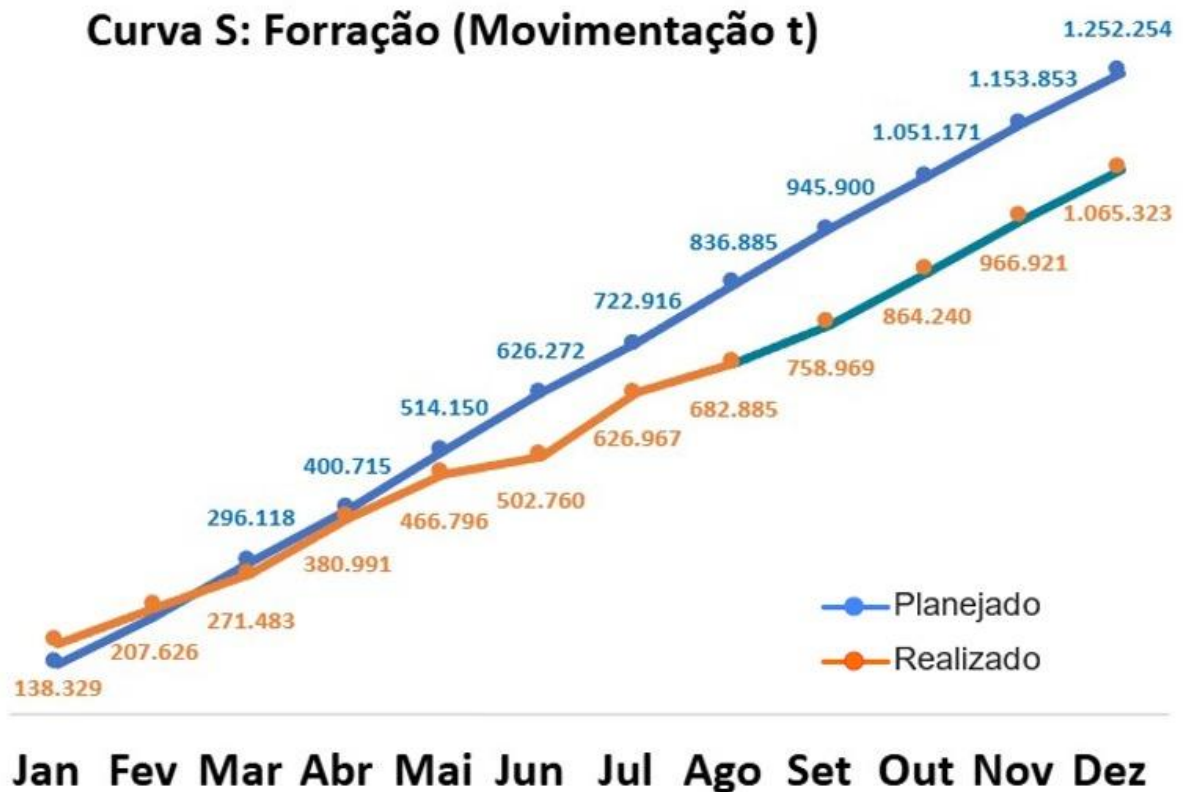
frota de transporte. O uso de bandeiras sinalizadoras e de placas portáteis de pare complementa esse processo para o alerta sobre interrupções momentâneas de fluxo.

Esses dispositivos garantem a fluidez do tráfego pesado mesmo em condições de visibilidade reduzida. A padronização desses sinais evita interpretações ambíguas pelos operadores dos equipamentos. Além disso, a segregação física entre a área de atividade e o fluxo veicular efetiva-se por meio da construção de leiras de segurança. Estas barreiras físicas funcionam como anteparos de proteção para o isolamento entre os operários e a movimentação da frota operacional. Assim, a manutenção da integridade dos colaboradores constitui a premissa central de todas as manobras de infraestrutura na unidade mineira.

Em paralelo às medidas de segurança, o monitoramento do progresso físico fundamenta-se na aplicação técnica da Curva S. Esta ferramenta possibilita a comparação direta entre os valores acumulados planejados e realizados ao longo do cronograma de trabalho. A métrica adotada para esse controle consiste na movimentação de material em toneladas, o que quantifica o volume de insumos aplicados nas camadas de blindagem.

A equipe de infraestrutura de mina assume a responsabilidade pela medição diária em campo e pela validação dos dados de avanço. Esse procedimento assegura a aderência técnica dos serviços executados em relação às especificações do projeto. Nesse contexto, a análise gráfica da Curva S mostra-se determinante para a identificação precoce de desvios no cronograma, pois permite ajustes imediatos na alocação de recursos e equipes. O monitoramento visual dessa movimentação de agregados é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Acompanhamento físico da obra (Curva S) e impacto logístico



Fonte: Autora (2026).

A partir da análise do gráfico ilustrado na Figura 9, observa-se uma inflexão negativa na tendência de avanço real a partir do mês de março de 2025. Esse evento consolidou uma lacuna volumétrica em relação ao planejamento inicial aprovado pela gerência. A visualização das linhas facilita a tomada de decisões corretivas ao evidenciar o afastamento morfológico entre a projeção teórica e a execução real, comportamento conhecido no meio técnico como boca de jacaré.

Consequentemente, essa discrepância visual destaca os impactos intensos dos gargalos logísticos sobre o desempenho geral do empreendimento. O atraso no recebimento de agregados externos configura-se como o fator principal para a divergência observada no cronograma de pavimentação. O acompanhamento rigoroso via Curva S permite, portanto, o diagnóstico preciso das causas de atraso e a transparência sobre a evolução física das obras de infraestrutura viária. Por fim, o ciclo de monitoramento obteve conclusão no mês de novembro, momento de consolidação estatística dos volumes finais aplicados na obra.

### 3.6 Instrumento de Coleta de Dados

Os instrumentos de coleta de dados englobam os recursos tecnológicos e dispositivos físicos mobilizados para a obtenção de parâmetros técnicos e operacionais. A integração dessas ferramentas assegura a fidedignidade das informações e permite a análise rigorosa do impacto da pavimentação na produtividade. Nessa perspectiva, a acurácia do estudo fundamenta-se na convergência entre sistemas automatizados de monitoramento e ferramentas específicas de engenharia de infraestrutura.

No que diz respeito aos registros cronometrados, o sistema de telemetria embarcada nos caminhões fora de estrada atua como o principal recurso de captura quantitativa. Essa tecnologia possibilita o registro eletrônico dos instantes de operação e das interrupções, o que elimina a imprecisão de medições manuais. Em conjunto, o software de despacho da unidade minerária funciona como a interface de gestão de status, onde os eventos de parada recebem codificações específicas para tratamento estatístico posterior.

Relativamente à engenharia de infraestrutura, o software Vero PGS atuou como um direcionador metodológico preliminar para o projeto das estradas de mina. Inicialmente, este sistema previa a modelagem geométrica e o controle rigoroso das etapas de execução das camadas de blindagem. Contudo, a necessidade de ajustes em campo para a viabilização de custos limitou a aplicação plena desse recurso. Ainda assim, as diretrizes extraídas do software auxiliaram na conformação das vias. Portanto, a consolidação dos volumes aplicados e os dados de telemetria assumiram o protagonismo na avaliação da aderência física das obras.

No âmbito da comunicação operativa, o rádio de comunicação atua como o meio de coleta qualitativa de dados em campo. Este instrumento viabiliza o contato direto entre os condutores da frota e a central de controle para a justificativa de impedimentos físicos. Dessa forma, essa interação qualifica os dados brutos da telemetria e permite o isolamento das paradas motivadas pela saturação hídrica das vias. Esse procedimento evita a contaminação da amostra por eventos de outra natureza, como falhas mecânicas. Em suma, a consolidação de todos estes instrumentos provê a base necessária para a validação técnica da intervenção proposta.

### 3.7 Tabulação dos Dados

A tabulação dos dados compreende a etapa de tratamento e organização sistemática de todas as informações obtidas através dos instrumentos de coleta. Este procedimento visa a conversão dos registros brutos em uma base de dados estruturada, o que possibilita a análise estatística rigorosa dos indicadores de desempenho. Logo, a sistematização correta é o que assegura a integridade dos resultados e a validade científica do diagnóstico operacional da unidade.

Nessa fase, ocorre a extração das séries temporais provenientes do sistema de despacho e da telemetria embarcada da frota dos caminhões fora de estrada. Os registros individuais de cada equipamento sofrem uma triagem para a classificação das paradas conforme as justificativas inseridas via rádio pelos operadores. Assim, essa organização permite o isolamento das interrupções motivadas pela precariedade estrutural das vias. Esse isolamento é o dado essencial para a identificação da lacuna de eficiência de aproximadamente 5 minutos.

Complementarmente, as informações de avanço físico registradas pelo software Vero PGS recebem tratamento para a verificação da aderência ao cronograma físico da obra. A consolidação desses volumes aplicados possibilita a construção da Curva S, que evidencia a evolução do projeto em toneladas de agregados. Dessa forma, o uso de ferramentas de análise quantitativa garante a precisão na geração dos gráficos que fundamentam a seção de Resultados e Discussões.

Por fim, a base de dados tabulada passa por um processo de purificação para a remoção de ruídos estatísticos. Filtros específicos excluem paradas motivadas por neblina ou falhas mecânicas, o que preserva a consistência dos registros da amostra sobre a trafegabilidade. Diante disso, esta organização prévia é o meio necessário para a validação da meta de 35 minutos e 55 segundos, além da comprovação da eficácia da infraestrutura proposta.

### 3.8 Considerações Finais do Capítulo

O presente capítulo estruturou o referencial técnico necessário para a investigação da eficácia da blindagem de acessos em mineração. Nesse sentido, a abordagem metodológica, classificada como estudo de caso quantitativo, permitiu a conexão direta entre os conceitos de engenharia de infraestrutura e os indicadores de gestão de frota. Ademais, a definição precisa das variáveis dependentes e independentes conferiu o rigor científico exigido para a validação da hipótese de pesquisa.

Sob essa perspectiva, a integração de instrumentos heterogêneos constitui o diferencial desta proposta. A integração da telemetria embarcada com as diretrizes metodológicas do software Vero PGS formou uma base de dados robusta. Conseqüentemente, essa sinergia garantiu que tanto a execução física das obras quanto o monitoramento operacional tivessem amparo em métricas objetivas e rastreáveis.

Somado a isso, o tratamento estatístico aplicado na tabulação dos dados assegurou a purificação das amostras. O isolamento das interferências externas por meio de filtros de controle cristalizou a relação causal entre a qualidade do pavimento e o tempo de retomada. Assim, a identificação da lacuna de eficiência de aproximadamente 5 minutos fundamenta-se, portanto, em evidências auditáveis e não em percepções empíricas.

Nesse contexto, a metodologia estabelecida oferece a sustentação necessária para a próxima etapa deste trabalho. Os procedimentos de coleta e organização das séries temporais viabilizam a exposição clara dos impactos produtivos alcançados com a intervenção. Por fim, o capítulo subsequente abordará, então, a apresentação e discussão analítica dos resultados obtidos a partir deste rigoroso protocolo experimental.

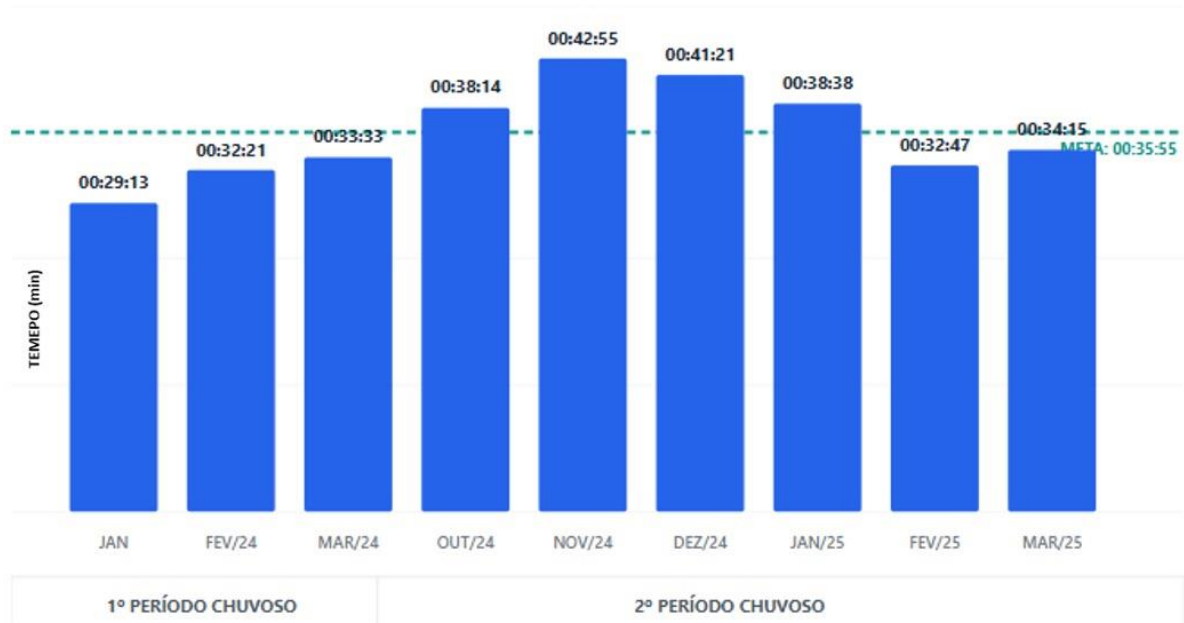
## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Este capítulo apresenta os dados coletados e as análises decorrentes da reestruturação viária na unidade de mineração. O estudo inicia-se com a exposição do diagnóstico operacional e a mensuração da lacuna de produtividade identificada no período anterior à intervenção. Posteriormente, o texto aborda a justificativa geotécnica para o dimensionamento do pavimento e os entraves logísticos que impactaram o cronograma físico da obra. O encerramento da seção contempla a avaliação do desempenho da pista sob condições reais de tráfego e intempéries, com o intuito de validar a eficácia da solução técnica implementada.

### **4.1 Diagnóstico Operacional e Identificação da Lacuna**

A etapa inicial do estudo consistiu no diagnóstico rigoroso dos acessos durante o período chuvoso anterior à intervenção. A análise das séries temporais revelou perdas produtivas significativas, com um tempo médio de retomada das operações fixado em 38 minutos e 3 segundos. Diante desse quadro de ineficiência, a meta estabelecida previa a redução do tempo de restabelecimento do tráfego para 35 minutos e 55 segundos. A lacuna identificada entre o cenário real e esse alvo direcional, que justifica a necessidade de uma intervenção estrutural, encontra-se visualmente detalhada na Figura 10.

Figura 10 - Gráfico de barras do tempo médio de retomada pós-chuva



Fonte: Autora (2026).

A partir da análise do gráfico exibido na Figura 10, torna-se evidente que a instabilidade mecânica da via sob saturação hídrica traduz operacionalmente a diferença cronometrada em relação ao alvo. Nesse contexto, o solo natural falha em suportar as solicitações do tráfego pesado e favorece o surgimento de processos erosivos críticos. Por esse motivo, a solução do problema exige a correção geométrica do traçado e o reforço da capacidade de carga do pavimento.

#### 4.2 Justificativa Geotécnica e Dimensionamento Estrutural

Inicialmente, o dimensionamento estrutural previu a substituição do subleito natural por um pacote de pavimentação de 0,73 metros de espessura para suprir a deficiência do solo local. A definição dessa dimensão dispensou a execução de ensaios teóricos, como o Índice de Suporte Califórnia (CBR), visto que o dimensionamento por esse método exigiria camadas excessivamente espessas e de custo proibitivo. Em substituição, a engenharia adotou o referencial empírico de boas práticas de uma unidade vizinha para a viabilização econômica da obra.

Em termos construtivos, a estrutura adotada divide-se em três camadas de agregados pétreos: bloco, brita 03 e bica corrida. Sob o aspecto funcional, a escolha desses materiais atende às exigências de suporte mecânico e de drenagem. Essa seleção técnica evita a ascensão capilar e o colapso da pista sob chuva intensa. A etapa inicial de aplicação dessa estrutura na via, com o espalhamento do material de maior granulometria, encontra-se evidenciada na Figura 11.

Figura 11 - Espalhamento das camadas de agregados pétreos



Fonte: Autora (2025).

A partir da observação do registro em campo demonstrado na Figura 11, nota-se o lançamento da camada de blocos de rocha diretamente sobre a base da via. Essa macroestrutura cria os vazios necessários para a drenagem profunda e atua como a fundação.

Acima desse nível, a brita 03 e a bica corrida completam o sistema. Desse modo, a configuração estratificada alinha-se de forma estrita às recomendações de Thompson, Peroni e Visser (2019) debatidas no referencial teórico. A camada superficial de bica corrida atua como o escudo protetor exigido pelos autores para selar a base contra a infiltração hídrica.

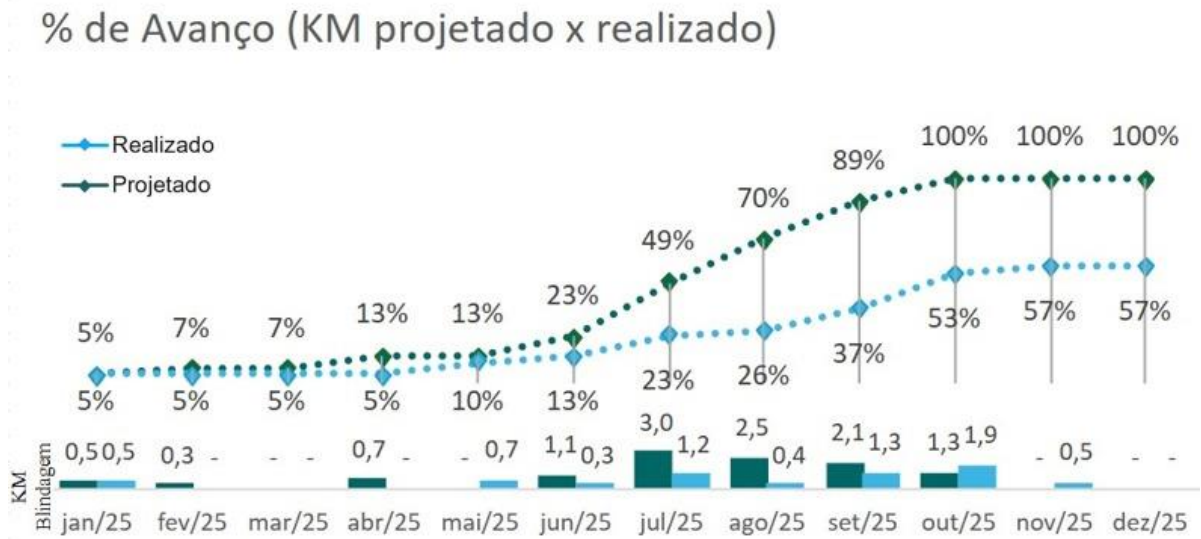
Além disso, a espessura total de 0,73 metros dissipa as tensões verticais geradas pelos caminhões fora de estrada antes da transferência da carga para o solo natural enfraquecido. O projeto consolida, portanto, a transição de uma rotina de manutenção reativa com materiais internos ineficazes para uma gestão de infraestrutura pautada em soluções de engenharia comprovadas na prática operacional.

### **4.3 Desafios Logísticos e Controle de Execução**

A execução do projeto enfrentou obstáculos logísticos capazes de impactar o cronograma físico-financeiro original. Nesse cenário, o atraso na entrega dos insumos configurou-se como o gargalo principal da obra. Cabe ressaltar que os materiais possuíam previsão de chegada para o mês de junho, com recebimento efetivo apenas no final de julho.

Essa falha de suprimento gerou um desvio decisivo na progressão teórica da Curva S do projeto. Na prática, a discrepância temporal entre o volume planejado e o realizado criou um nítido afastamento gráfico das linhas a partir do mês de março de 2025. Sob o aspecto gerencial, essa divergência evidencia a perda de ritmo da intervenção ao longo dos meses críticos de planejamento. O controle do avanço físico e o descolamento da execução em campo são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Comparativo de avanço físico linear planejado versus realizado.



Fonte: Autora (2025).

A partir da análise visual exposta na Figura 12, confirma-se o impacto do gargalo logístico sobre a produção linear. Nota-se que, nos meses de julho e agosto, a execução física atingiu apenas 1,2 km e 0,4 km, de forma respectiva, frente às metas projetadas de 3,0 km e 2,5 km. Esse déficit produtivo resultou na estagnação do avanço real no patamar de 57% a partir de novembro, fator que impediu o alcance da meta de conclusão integral prevista para outubro. Assim, os dados comprovam que a janela operacional de pavimentação sofreu restrições rigorosas em virtude da indisponibilidade de agregados.

Apesar do contratempo logístico, a equipe técnica implementou protocolos rigorosos de segurança para viabilizar os serviços na área de lavra. A adoção do sistema de pare e siga em meia pista e a execução estratégica de bloqueios totais temporários, em conjunto com a construção de leiras de proteção, permitiram a continuidade da pavimentação. Dessa maneira, essas medidas evitaram a paralisação irrestrita da frota de transporte durante o expediente.

#### 4.4 Avaliação do Desempenho Pós-Intervenção

Inicialmente, a avaliação de desempenho quantitativa sofreu adequações em virtude da paralisação das atividades operacionais da unidade mineira. Dessa forma, a aferição exata do novo tempo de retomada e o cálculo dos ganhos de velocidade da frota tornaram-se temporariamente inexequíveis. Apesar disso, o período chuvoso serviu como um cenário de teste em escala real sob condições extremas para a comprovação da integridade estrutural da obra concluída em novembro. Nesse cenário, a análise de eficácia redirecionou o seu foco primário para a estabilidade mecânica e para a preservação física do trecho pavimentado.

Nesse cenário, a adequação geométrica do traçado mitigou de forma imediata o acúmulo superficial de águas pluviais. Como consequência, a intervenção promoveu a redução expressiva dos processos erosivos ao longo de toda a estação de chuvas. Na prática, a pista revestida com materiais agregados manteve o seu perfil transversal intacto mesmo sob precipitações severas e contínuas. Por conseguinte, a via de acesso demonstrou uma resiliência estrutural significativamente superior em comparação ao revestimento primário natural utilizado na mina em períodos anteriores.

Em relação à integridade da frota, a regularidade da nova superfície de rolamento gerou benefícios diretos e mensuráveis para os caminhões fora de estrada. Os registros do sistema embarcado apontaram uma redução acentuada nos alarmes de torção de chassi dos equipamentos. Essa métrica comprova que a blindagem elimina os buracos e as deformações plásticas responsáveis pela transferência de tensões destrutivas para os veículos. Logo, a pavimentação atua ativamente na preservação dos ativos móveis de alto valor da empresa.

Em síntese, a impossibilidade momentânea de medir o ganho de produtividade em minutos não invalida o êxito da solução de engenharia adotada. Pelo contrário, os ganhos qualitativos em trafegabilidade atestam a adequação do dimensionamento com bloco, brita 03 e bica corrida. A infraestrutura concebida deixa de ser um ponto de estrangulamento na planta, de modo que o acesso se encontra plenamente capacitado para o escoamento seguro da produção assim que a unidade retomar o seu plano de lavra.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Esta seção consolida as considerações finais sobre a eficácia da blindagem de acessos como solução para a instabilidade operativa em períodos de chuva. O texto sintetiza as evidências técnicas e operacionais que atestam o êxito da intervenção estrutural executada na unidade mineira. Além disso, o capítulo apresenta sugestões de diretrizes e estudos complementares com o intuito de garantir a continuidade do monitoramento e a expansão da metodologia aplicada.

### 5.1 Conclusão

Este estudo cumpriu o objetivo de validar a blindagem de acessos como uma solução eficaz para a instabilidade operacional em períodos chuvosos. Apesar de a paralisação da unidade em janeiro de 2026 ter impedido a validação matemática do tempo de retomada, o cenário de validação em escala real atestou o êxito da intervenção estrutural concluída em novembro de 2025. Em síntese, a presente investigação respondeu de forma direta à questão de pesquisa ao comprovar que a substituição do solo natural por um pacote de pavimentação robusto garante a estabilidade mecânica da pista sob condições de saturação hídrica severa.

Do ponto de vista técnico, a aplicação da estrutura de 0,73 metros de agregados pétreos solucionou a deficiência de suporte original do subleito por meio da adoção do referencial de boas práticas. Adicionalmente, a camada de desgaste atuou como uma proteção eficaz contra a infiltração hídrica, de modo a preservar a integridade da base sob condições de saturação. Dessa forma, esse resultado valida a literatura técnica sobre gestão de ativos, na qual a via de transporte assume o papel de um elemento produtivo essencial e não apenas de uma superfície de tráfego passiva.

Sob a ótica operacional, o ganho de eficiência refletiu-se em benefícios diretos e substanciais para a mineração. Em termos práticos, a regularidade da pista suprimiu as deformações plásticas e reduziu drasticamente os alarmes de torção de chassi nos caminhões fora de estrada. Dessa maneira, a otimização da infraestrutura converteu-se em uma proteção ativa para a frota e em uma diminuição do custo operacional invisível, o que atesta a

viabilidade financeira da transição de uma manutenção reativa para uma abordagem preventiva.

## **5.2 Recomendações para trabalhos futuros**

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se a implementação de um programa de monitoramento de longo prazo no trecho pavimentado, bem como a retomada da cronometragem dos ciclos de transporte assim que a unidade restabelecer as suas operações. Nesse contexto, a observação contínua durante os próximos períodos chuvosos permitirá atestar a real vida útil do revestimento e, fundamentalmente, comprovar matematicamente o alcance da meta de 35 minutos e 55 segundos. Além disso, essa coleta sistemática de dados facilitará a identificação de anomalias precoces e a calibração dos futuros projetos de engenharia de acessos da unidade.

No âmbito financeiro, sugere-se a elaboração de um estudo minucioso acerca do retorno do investimento da obra. Para tanto, a análise deve cruzar os custos diretos de implantação dos agregados com a economia gerada pela redução do consumo de combustível e pela queda já atestada nos alarmes de torção de chassi. Desse modo, essa avaliação quantitativa consolidará a justificativa técnica para a alocação de recursos em soluções de pavimentação estruturada.

Por último, indica-se a expansão da metodologia aplicada para outros acessos críticos e frentes de lavra da operação. Conforme exposto ao longo do estudo, o protocolo de diagnóstico das perdas de tempo e a adoção de referenciais empíricos de excelência para o dimensionamento provaram ser ferramentas de elevado rigor técnico e viabilidade prática. Assim, a padronização desta estrutura nos demais trechos críticos elevará a disponibilidade física das vias, com a mitigação de riscos de segurança e o incremento no volume movimentado pela mina.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **NRM 13**: Circulação e transporte de pessoas e materiais. Brasília, DF: ANM. Disponível em: [https://anmlegis.datalegis.net/action/TematicaAction.php?acao=abrirVinculos&cotematica=13594617&cod\\_menu=6710&cod\\_modulo=351](https://anmlegis.datalegis.net/action/TematicaAction.php?acao=abrirVinculos&cotematica=13594617&cod_menu=6710&cod_modulo=351). Acesso em: 11 fev. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10182**: Lavra de jazidas de minerais metálicos, não metálicos e carvão. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras; Abeda, 2022.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr\\_719\\_manual\\_de\\_pavimentacao\\_versao\\_corrigda\\_errata\\_1.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf). Acesso em: 27 nov. 2025.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de sinalização de obras e emergências em rodovias**. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Desmistificando a ferramenta Curva S no planejamento**. Brasília, DF: Ministério dos Transportes, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/portal-da-estrategia/artigos-gestao-estrategica/desmistificando-a-ferramenta-curva-s-no-planejamento>. Acesso em: 9 dez. 2025.

CATERPILLAR. **Caminhões de Mineração 785**. 2026. Disponível em: [https://www.cat.com/pt\\_BR/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/104480.html](https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/104480.html). Acesso em: 19 fev. 2026.

FERNANDES, Rafael da Silva. **Metodologias para determinação de periodicidade ótima de manutenção preventiva sob a suposição de reparo imperfeito em manutenção corretiva**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

HUGO, Daniel. **Haul road defect identification and condition assessment using measured truck response**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria, Pretória, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Diretrizes para segurança de processo na mineração**. São Paulo, SP: Ibram, maio 2024. Disponível em: [https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/05/Diretrizes-para-seguranca-de-processo-na-mineracao\\_WEB-1-2.pdf](https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/05/Diretrizes-para-seguranca-de-processo-na-mineracao_WEB-1-2.pdf). Acesso em: 19 dez. 2025.

