



FRANCISCO DE ASSIS GUIMARÃES NETO

**AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO DE MATERIAL AGREGADO PARA ACESSOS DE
MINA VISANDO MAIOR PRODUTIVIDADE DE TRANSPORTE – COMPLEXO
MARIANA**

Ouro Preto, MG

2022

Francisco de Assis Guimarães Neto

**AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO DE MATERIAL AGREGADO PARA ACESSOS
DE MINA VISANDO MAIOR PRODUTIVIDADE DE TRANSPORTE –
COMPLEXO MARIANA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Lavra de Minas a Céu Aberto].

Orientador: Prof. Fabiano Veloso Ferreira

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 14 de junho de 2022 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Fabiano Veloso Ferreira
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV-Mi)

Vidal Félix Navarro Torres
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV-Mi)

Leandro Geraldo Canaan Silveira
Membro externo – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).

PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/08CF-7A07-FD4C-CE92> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/08CF-7A07-FD4C-CE92> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 08CF-7A07-FD4C-CE92



Hash do Documento

A0737A4F3792D70CB32FDDD3276758A482773BEE938E8923EF8FC5AD55415A36

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 21/07/2022 é(são) :

- Leandro Geraldo Canaan Silveira (Signatário) - em 21/07/2022 14:31 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: leandro.silveira@vale.com

Evidências

Client Timestamp Thu Jul 21 2022 14:31:31 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -19.6576085 Longitude: -43.2400595 Accuracy: 1462.6182837544957

IP 200.6.35.101

Hash Evidências:

0A9E4F9EE8D962DF24E95E0542C165C5015F8E8258A49933E1379EF8C341D669

- Fabiano Veloso Ferreira (Signatário) - em 14/07/2022 15:37 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: fabiano.v.ferreira@itv.org

Evidências

Client Timestamp Thu Jul 14 2022 15:37:59 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -19.7654627 Longitude: -43.0352968 Accuracy: 12

IP 187.86.78.47

Hash Evidências:

40C8391046811FB38541EE9EFDF5C4B2910357B6F827FA2556946A566806150D

- Vidal Félix Navarro Torres (Signatário) - 275.950.565-00 em 14/07/2022 15:01 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Autenticação de conta

Evidências

Client Timestamp Thu Jul 14 2022 15:01:13 GMT-0300 (GMT-03:00)

Geolocation Latitude: 38.6709923 Longitude: -9.1652738 Accuracy: 22.785

IP 95.93.159.190

Hash Evidências:

71245C2FFF503064D0F54487B29EDE590CFDB5EF9FB00B8BA4B498977D67D3A4



FRANCISCO DE ASSIS GUIMARÃES NETO

**AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO DE MATERIAL AGREGADO PARA ACESSOS DE
MINA VISANDO MAIOR PRODUTIVIDADE DE TRANSPORTE – COMPLEXO
MARIANA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em Lavra de Minas a Céu Aberto.

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Fabiano Veloso Ferreira, M.Sc.

Ouro Preto, MG

2022

Título: AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO DE MATERIAL AGREGADO PARA ACESSOS DE MINA VISANDO MAIOR PRODUTIVIDADE DE TRANSPORTE – COMPLEXO MARIANA

Classificação: (X) Confidencial () Restrita () Uso Interno () Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G963a

Guimarães Neto, Francisco de Assis

Avaliação e aplicação de material agregado para acessos de mina visando maior produtividade de transporte: complexo de Mariana/ Francisco de Assis Guimarães Neto – Ouro Preto, MG: ITV, 2022.
62 f.: il.

Monografia (Especialização *latu sensu*) - Instituto Tecnológico Vale, 2022.

Orientador (a): Fabiano Veloso Ferreira

1. Dimensionamento de pavimentos. 2. Acesso de mina.
3. Blindagem 4. Processo construtivo I. Título

CDD. 23. ed. 622.2

Bibliotecária responsável:

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu anjo da guarda que me conduz nas decisões da vida, a Vale e os gestores pela oportunidade e disponibilidade, aos professores do ITV pelos ensinamentos e a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para que este projeto se tornasse realidade.

RESUMO

Na mineração, os impactos positivos ou negativos associados às condições de acessos em uma mina, é muito maior do que, via de regra, o tamanho da importância que é dedicado para essas estruturas. Para estradas rodoviárias esse processo está mais bem definido, e existem regras claras tanto na sua concepção quanto na sua realização. Devido as especificidades das operações mineiras, as estradas de mina possuem características próprias, que conduzem à necessidade de tratativas diferenciadas em relação aos pavimentos rodoviários. Felizmente, estamos de uma forma geral, evoluindo neste tema e tratando essa questão de forma diferente. Prova disso é o trabalho de blindagem dos acessos que vem acontecendo no Complexo de Mariana, da mineradora Vale S.A. que é objeto de estudo e análise deste trabalho. A avaliação prévia através de métodos consultivos com aplicação do CBR, parâmetros referentes à capacidade de suporte aos carregamentos impostos, com utilização de material adequado e seguindo uma metodologia pré-definida traz inevitavelmente resultados positivos do ponto de vista de produtividade, economicidade, e principalmente segurança.

Palavras chaves: Dimensionamento de pavimentos, acessos de mina, processo construtivo.

ABSTRACT

In mining, the positive or negative hits associated with conditions in a mine is much greater than, as a rule, the size of importance that is devoted to structures. For highway roads, this process is better defined, and there are rules both in its conception and in its execution. Due to the specificities of mining operations, mine roads have their own characteristics, which lead to the need for different treatments in relation to road pavements. Fortunately, we are generally evolving on this topic and treating this issue differently. Proof of this is the work of Vale accesses that comes in the blind construction of the Mariana complex, which is the object of study and analysis of this work. The prior assessment through loading methods, references to the carrying capacity of imposed loads, using appropriate materials, following a basic methodology from the point of view of productivity, economy, and mainly, safety.

Keywords: Pavement design, mine accesses, constructive process

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Parâmetros e métodos construtivos de vias.....	17
Figura 2: Descrição da metodologia de projeto de pavimentação.	18
Figura 3: Representação de uma pavimentação típica.	19
Figura 4: Drenagem superficial de vias de acesso.	20
Figura 5: Etapas da construção de estradas.	21
Figura 6: Principais materiais granulares, solos e solo-agregados empregados em bases, sub-bases ou reforços de subleito: (a) Brita graduada simples, b) Bica Corrida, c) Rachão, d) Macadame hidráulico, e) Macadame seco, f) Macadame seco: detalhe da graduação).....	25
Figura 7: Principais materiais granulares, solos e solo-agregados empregados em bases, sub-bases ou reforços de subleito: a) Solo-brita descontínuo: mistura em pista, b) Detalhe da camada compactada, c) Solo-brita, d) Solo-areia: mistura em pista, e) Argila arenosa laterítica: trincas devido à perda de umidade da camada compactada, f) Solo arenoso fino laterítico LA: trincas devido à perda de umidade da camada compactada.	25
Figura 8: Defeitos comuns nas estradas de mina: a) Buracos, b) Poeira excessiva.....	29
Figura 9: Defeitos comuns em estradas de mina - c) Material solto d) Borrachudo e) Seção transversal inadequado f) Trilhas de rodas.....	29
Figura 10: Ábaco de CBR.....	31
Figura 11: Sistema Sudeste, Complexo Mariana- MG.	33
Figura 12: Mapa geológico da Mina Fazendão - MG.....	34
Figura 13: Brita 3	35
Figura 14: Pedra de mão.....	36
Figura 15 – Brita corrida	36
Figura 16: Caminhão CAT 789D	37
Figura 17: Caminhão Komatsu 730E	37
Figura 18: Resultado gráfico do CBR dos acessos do complexo	39
Figura 19 - Determinação da espessura total.....	41
Figura 20: Espessura das camadas	42
Figura 21: Trecho definido para a aplicação	43
Figura 22: Trecho 1	43

Figura 23: Trecho 2	44
Figura 24: Passo a passo para blindagem	45
Figura 25: Execução da blindagem	46
Figura 26: Velocidade média mensal, 2017 a 2021. Trecho Alegria ao Morro da Mina. 48	48
Figura 27: Velocidade média anual - Trecho Alegria – Fazendão.....	49
Figura 28: Velocidade média mensal, 2017 a 2021. Trecho Lagoa 29 a Fazendão.....	50
Figura 29: Gráfico de Precipitações acumuladas, em 2021, Mariana - MG.....	51
Figura 30: Pluviometria – Complexo Mariana.....	52
Figura 31: Pluviometria – Fazendão.....	52
Figura 32: Trecho sem blindagem	54
Figura 33: Trecho com Blindagem.....	54
Figura 34: Mapa com a localização dos radares MESMS4.....	55
Figura 35: Resultados das análises com o MEMS4.....	56
Figura 36: Exemplo Sump E6	57
Figura 37: Massa movimentada - Sump E6	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de resistência ao rolamento em função dos diferentes tipos de vias. ..	22
Tabela 2: Capacidade de suporte para diferentes tipos de material.	23
Tabela 3: Classificação dos materiais para base.....	24
Tabela 4: Defeitos mais comuns em estradas de mina.	28
Tabela 5: Resultados dos ensaios de CBR.....	38
Tabela 6: Dados dos caminhões.....	40
Tabela 7: Velocidade média mínima e máxima no mês	49
Tabela 8: Velocidade média mínima e máxima no mês no trecho Lagoa 29 a Fazendão	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Conceituação de Estradas	16
3.2	Projetos de Estrada de Mina	16
3.3	Projetos de Pavimentação	17
3.4	Projeto de drenagem	20
3.5	Construção de Estradas	20
3.5.1	Resistência ao Rolamento	21
3.5.2	Seleção do material	22
3.5.3	Requisito de compactação	26
3.5.4	Técnicas de tratamento contra o pó	27
3.6	Manutenção, readequação e segurança	27
3.7	Índice de Suporte Califórnia	30
4	METODOLOGIA	32
4.1	Local do objeto do estudo	32
4.2	Definição do material da base, sub-base e revestimento	34
4.3	Dimensionamento do pavimento	36
4.3.1	Obtenção do CBR	40
4.3.2	Determinação da carga de roda	40
4.3.3	Determinação da espessura total da camada	41
4.3.4	Determinação da espessura da camada de sub-base	41
4.3.5	Determinação da espessura da camada de base	42
4.3.6	Determinação da espessura da camada de revestimento	42
4.4	Aplicação	42
4.4.1	Manutenção dos acessos blindados	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1	Estudo da velocidade média	48

5.1.1 Trecho: Alegria ao Morro da Mina	48
5.1.2 Trecho Lagoa 29 a Fazendão	50
5.2 Pluviometria local.....	51
5.3 Análise dos resultados	53
5.4 Efeitos colaterais observados.....	57
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	Erro! Indicador não definido.
7 REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

As estradas e acessos dentro de uma mina tem como função a transitabilidade e acessibilidade ao corpo mineralizado. Dessa forma, o projeto estrutural de uma mina é feito utilizando como parâmetro os equipamentos dimensionados para a lavra, bem como suas respectivas velocidades médias, suas cargas úteis e outros parâmetros. Com um projeto de mina adequado, é assegurada uma boa segurança e produtividade, além da atenuação nos desgastes dos equipamentos.

O acervo bibliográfico sobre projetos de estradas de mina é bem reduzido, e limitado em certos pontos, dessa forma, se faz necessário a busca nas bibliografias estrangeiras. Os estudos existentes tomam por base alguns parâmetros de pavimentos rodoviários, que mesmo sendo distintos em certos pontos, possuem similaridades na construção e podem ser adaptadas a mineração garantindo segurança e operacionalidade (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2010).

No entanto, dada as condições específicas de projeto de mineração, características físicas do material, índices pluviométricos, distâncias médias de transporte, relevo, porte de equipamentos, entre outros, a possibilidade de se ter parâmetros mais específicos para essa operação, traz indubitavelmente ganhos relevantes em vários aspectos.

Na realização do projeto estrutural é considerado o dimensionamento do pavimento, definindo a espessura e a composição de cada camada, sendo elas: revestimento, base e sub-base, que serão construídas sob o material *in situ* chamado de subleito. No Complexo Mariana foi feita a pavimentação das estradas de acesso das minas, mediante a técnica denominada “blindagem”, tendo-se utilizado o CBR para escolha dos materiais do local em estudo. Este método tem como base o ensaio CBR e a carga de roda que visa aferir o suporte de cada camada usada no pavimento (SOUSA, 2011).

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) comumente chamado ensaio CBR é um dos métodos mais utilizados por engenheiros e órgãos rodoviários, ele tem por objetivo estabelecer a capacidade que um solo compactado suporta. Ele é determinado a partir da relação entre a pressão necessária para um pistão padronizado penetrar em um corpo de prova, e este mesmo pistão penetrar em uma brita graduada. Além da obtenção da capacidade que um solo compactado suporta, é possível obter o índice de expansibilidade do solo, critério ligado a durabilidade do pavimento (DRESCH, 2018).

As boas ou más condições da superfície de rolamento das estradas estão atreladas às especificidades de cada região, como tipo de solo e granulometria, capacidade de suporte

(CBR), clima, topografia, tráfego e a manutenibilidade da mesma são características técnicas fundamentais para garantir condições de tráfego de forma segura e satisfatória da via, que por sua vez, são atributos que influenciam diretamente no surgimento de patologias e/ou defeitos que comprometem seu uso (NUNES, 2003; PINHEIRO *et al.*, 2020).

O dimensionamento das estruturas do pavimento é de extrema importância, já que com uma estrada mal dimensionada a segurança e os índices de produção são afetados diretamente. Dessa forma, a assertividade na construção baseado na técnica busca assegurar fatores como: segurança, velocidade média, produtividade, menor desgaste nos equipamentos e consequentemente maior vida útil dos equipamentos.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o método de blindagem realizado nas estradas de mina do Complexo Mariana – MG, além de avaliar indicadores de segurança e economia e produtividade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o método de blindagem das estradas de mina do Complexo Mariana-MG da Mineradora Vale bem como os resultados de produtividade, segurança e economia obtidos.

2.2 Objetivos Específicos

- Investigar os parâmetros construtivos do projeto de pavimentação das estradas de mina;
- Mensurar e analisar ganhos de produtividade de transporte, segurança e economia.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Conceituação de Estradas

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na norma NBR 10182/98, conceitua estradas sendo acessos e vias onde há tráfego de cargas entre bancadas, acessos a instalações de tratamento de minérios, pilhas de disposição de material estéril e pilhas de estoque de produtos, dentre outros.

3.2 Projetos de Estrada de Mina

Conforme Sousa (2011 apud REIS, 2014, p. 27) “requisitos de projetos, métodos construtivos e técnicas de manutenção aplicadas a estradas rodoviárias pavimentadas, vicinais de terra e florestais, podem ser aproveitados em estradas de mina, desde que as devidas adaptações sejam realizadas. ”

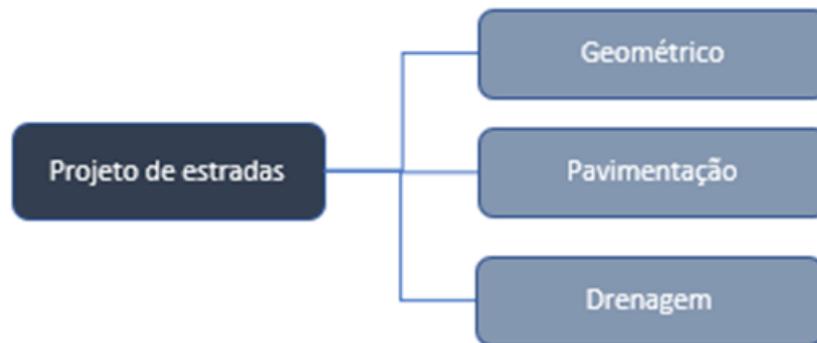
A legislação de projetos de construção de rodovias é adaptada a estradas de mina. Dessa forma, é necessário atender os dois projetos básicos que formam o Projeto de Engenharia Rodoviário: Projeto Básico de Engenharia e Projeto Executivo de Engenharia (DNIT, 2006).

O Projeto Básico de Engenharia é previsto no art. 6º, inciso IX, da Lei nº 8.666/1993, trata-se de um documento primordial na licitação de obras e serviços. Nele devem estar definidos todos os elementos necessários e suficientes à plena identificação da obra ou serviço, a fim de possibilitar aos licitantes a formulação de suas propostas em igualdade de condições. Segundo a Lei n.º 8.666/93, art. 6.º. IX, X, Projeto Executivo de Engenharia "É o conjunto dos elementos necessários e suficientes à execução completa da obra, de acordo com as normas pertinentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT".

Conforme Sousa (2011, p.32)

“as estradas de mina devem ser projetadas e construídas segundo critérios específicos de caráter geométrico, estrutural, funcional e de drenagem, em conformidade com as legislações ambientais e normas regulamentadoras de saúde e segurança vigentes. A Figura 1 abaixo esquematiza os itens necessários para o projeto.”

Figura 1: Parâmetros e métodos construtivos de vias.



Fonte: Adaptado de MASETTI *et al.* (2011)

Além de cumprir tais requisitos, é necessário que o sistema seja seguro e garanta a operacionalidade de uma forma sustentável. Dessa forma as Normas Reguladoras de Mineração (NRM) n°. 13 impõe diversos requisitos para o tráfego de equipamentos de transporte em mina, sendo alguns deles listados abaixo.

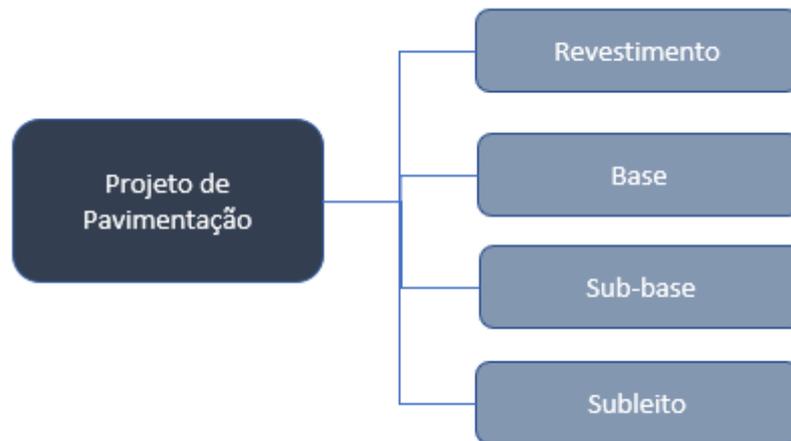
- Possuir um plano de trânsito que determine distâncias mínimas entre máquinas, equipamentos e veículos de acordo com suas respectivas velocidades médias e capacidade de frenagem;
- Largura mínima das vias de trânsito deve ser duas vezes maior que a largura do maior veículo utilizado, em caso de mão única e três vezes maior quando a via é de mão dupla;
- Construção de leiras nas laterais das bancadas ou estradas onde houver riscos de quedas de veículos, conforme dimensões dos equipamentos que circulam na via;
- Umidificação de vias não pavimentadas;
- Sinalização luminosa em condições de visibilidade adversa.

3.3 Projetos de Pavimentação

Segundo Reis (2014) o projeto de pavimentação é subdividido em dois projetos, o projeto estrutural e o projeto funcional. O projeto estrutural trata de dimensionar e selecionar os

materiais das camadas que dão suporte ao projeto, sendo elas: base, sub-base e reforço do subleito. O projeto funcional por sua vez trata de dimensionar a camada de revestimento, aquela que vai receber maior carga estática. (THOMPSON & VISSER, 2008). A Figura 2 mostra as camadas que devem ser dimensionadas dentro de um projeto de pavimentação:

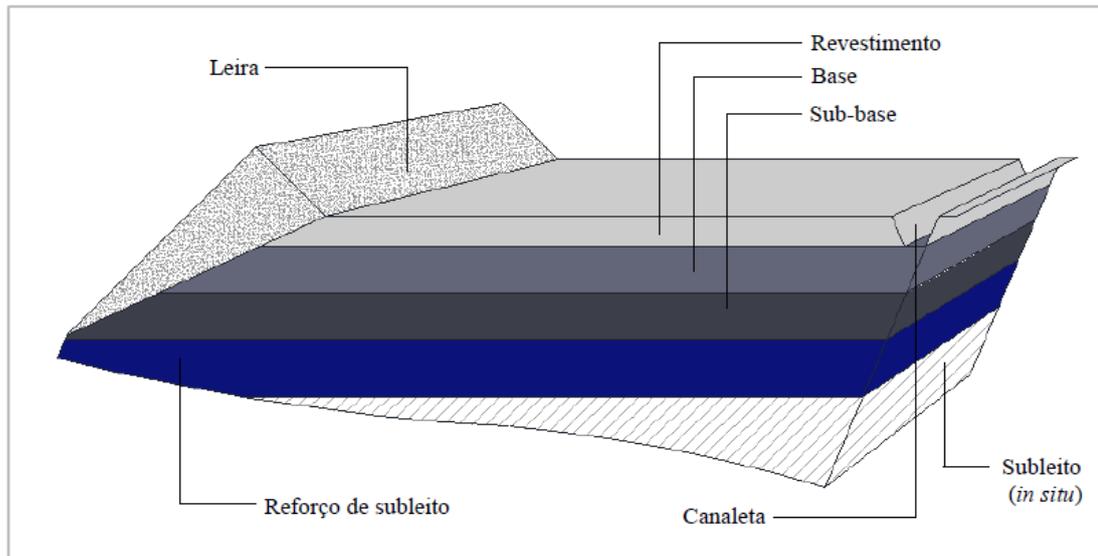
Figura 2: Descrição da metodologia de projeto de pavimentação.



Fonte: Adaptado de MASETTI *et al.* (2011)

Com o aprofundamento da estrutura o esforço de carga vai diminuindo. Dessa forma, o material da camada superior deve ter maior resistência a compressão que o material da camada inferior. Ou seja, o revestimento deve ter maior resistência a compressão, que por sua vez deve ser maior que o da base, e assim até que se chegue ao subleito (BERNUCCI, 2007). A Figura 3 representa um dimensionamento típico para uma pavimentação.

Figura 3: Representação de uma pavimentação típica.



Fonte: SOUSA (2011, p.14)

Masetti (2011) conceitua revestimento, base, sub-base e subleito como:

- Revestimento: esta camada deve ter resistência ao desgaste, promover tração, possuir baixa permeabilidade fazendo com que a drenagem seja efetiva. Estão listados alguns quesitos para se ter um bom revestimento
- Boa trafegabilidade em condições climáticas adversas;
- Baixa emissão de poeira;
- Boa aderência quando o piso estiver molhado;
- Base: tem como função principal a distribuição das tensões recebidas do revestimento, de forma que passe a mínima carga para a sub-base e ela tenha pouca deformação. A escolha do material utilizado nessa camada é de extrema importância, pois caso não dimensionado corretamente pode comprometer a mobilidade e uma deterioração excessiva;
- Sub-base: é constituída principalmente por material granular, e sua função primordial é a drenagem e a distribuição do carregamento. Normalmente ela é construída sobre solos incompetentes;
- Subleito: é a fundação, deve suportar os carregamentos vindos das camadas superiores. Pode ser constituída por material in situ ou por solos ou rochas compactas.

Quando o subleito não tem competência para dar suporte as camadas sobrejacentes, é necessário fazer um reforço conforme Dresch (2018), uma camada estabilizada granulometricamente, sobre o subleito para reduzir espessuras elevadas da sub-base, devido ao baixo suporte do subleito.

3.4 Projeto de drenagem

Masetti (2011) conceitua a necessidade de um projeto de drenagem devido a interceptação que uma via de acesso implica em fluxo de águas superficiais ou subterrâneas. Desse modo, um sistema adequado de drenagem se torna essencial para uma estrada de mina. Sem esse sistema, a via sofrerá deterioração até que seja total, exigindo muito em termos de reparação, manutenção e condições inseguras para o tráfego de veículos. A Figura 4 demonstra o funcionamento de um método de drenagem superficial de vias de acesso.

Figura 4: Drenagem superficial de vias de acesso.



Fonte: MASETTI *et al.* (2011)

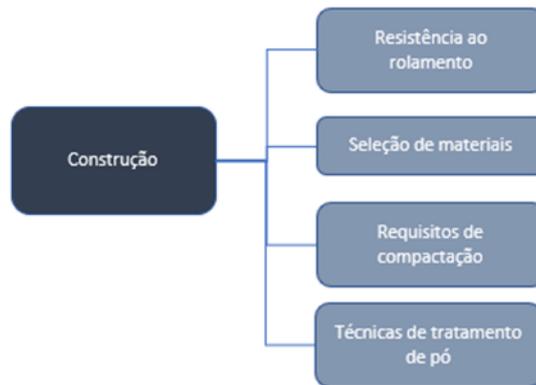
3.5 Construção de Estradas

Tem-se por objetivo na construção de um pavimento manter a segurança durante o uso. Dessa forma, é necessário seguir alguns requisitos como: atenuar os desgastes com pneu e

ruídos, resistir ao desgaste de uso, ter um sistema de drenagem eficiente a fim de aguentar o mau tempo e ter resistência a derrapagens (DRESCH, 2018).

Para atender a esses requisitos, é necessário que seja seguida etapas imprescindíveis, as quais estão expostas na Figura 5 abaixo:

Figura 5: Etapas da construção de estradas.



Fonte: Adaptado de MASETTI *et al.* (2010)

3.5.1 Resistência ao Rolamento

A resistência ao rolamento pode ser definida segundo Masetti (2011), através da força que é exercida para que uma roda seja puxada sobre o terreno, sendo essa força afetada pelas condições de carregamento e do terreno. De forma que, quanto mais profundo uma roda fica em um terreno, maior é a resistência ao rolamento deste terreno.

É de extrema importância a avaliação da resistência ao rolamento para a construção de um pavimento, tendo como objetivo principal a escolha do material mais adequado. A escolha do material envolve diversos fatores, dentro deles estão a emissão de particulados que sendo muito intenso pode colocar em risco o tráfego e afetar as comunidades vizinhas ao empreendimento mineral. (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2010). A resistência ao rolamento pode ser determinada sendo alguns valores apresentados na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Valores de resistência ao rolamento em função dos diferentes tipos de vias.

Piso	Resistência ao Rolamento Porcentagem			
	Pneus Diagonais Radiais		Esteiras	Esteiras + Pneus
Pista de superfície muito dura, lisa, de concreto, asfalto frio ou de terra, sem penetração ou flexão	1,5%	1,2%	0,0%	1,0%
Pista de superfície dura, lisa, estabilizada, sem penetração sob carga, irrigada e bem conservada	2,0%	1,7%	0,0%	1,2%
Pista de superfície firme, lisa, com terra ou revestimento leve, flexionado ou ondulado ligeiramente sob carga, conservada regularmente, irrigada.	3,0%	2,5%	0,0%	1,8%
Pista de terra sulcada, flexionando sob carga, com pouca ou nenhuma manutenção, sem irrigação. Penetração o flexão de pneus de 25mm	4,0%	4,0%	0,0%	2,4%
Pista de terra sulcada, flexionando sob carga, com pouca ou nenhuma manutenção, sem irrigação. Penetração ou flexão de pneus de 50mm	5,0%	5,0%	0,0%	3,0%
Pista de terra sulcada macia, sem manutenção, nem estabilização. Penetração ou flexão de pneus de 100mm	8,0%	8,0%	0,0%	4,8%
Areia ou pedregulho solto	10,0%	10,0%	2,0%	7,0%
Pista de terra sulcada macia, sem manutenção, nem estabilização. Penetração ou flexão de pneus de 200mm	14,0%	14,0%	5,0%	10,0%
Pista de terra sulcada muito macia, lamacenta, com penetração de pneus de 300mm, sem flexão.	20,0%	20,0%	8,0%	15,0%

Fonte: Adaptado de Valores de resistência ao rolamento (Caterpillar, 2000)

A resistência ao rolamento pode ser reduzida mantendo as estradas em boas condições, dessa forma aumentando a produtividade e segurança de quem trafega na via. É estimado que a redução de 1% da resistência ao rolamento aumenta em 10% a velocidade do caminhão em uma rampa e cerca de 26% no plano, esses dados podem ser obtidos utilizando programas de simulação com os dados obtidos nos manuais dos equipamentos (THOMPSON e VISSER, 2008).

3.5.2 Seleção do material

Os critérios de seleção do material de construção das camadas são baseados em propriedades físicas dos materiais, tais como distribuição granulométrica, resistência à

compressão, alterabilidade e rigidez, dentre outros. O material pode ser cominuído, em alguns casos, a fim de adaptá-lo à uma granulometria menor determinada. Como a camada de revestimento recebe as ações de desgaste e maior carregamento dinâmico imposto pelo tráfego de equipamentos e veículos, ela exige o melhor material disponível (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2010).

A capacidade de suporte de um solo corresponde à resistência desse solo. A Tabela 2 abaixo exemplifica a capacidade de suporte de alguns materiais.

Tabela 2: Capacidade de suporte para diferentes tipos de material.

Tipo de material	Capacidade de suporte (kPa)
Rocha dura	>5520
Rocha com dureza mediana	2760-4140
Cascalho compacto; areia muito compacta e cascalho	825-1100
Rocha branda	690-825
Areia média compacta e compacta e cascalho	550-690
Argila pré-adensada seca	410-550
Areia grossa a média fofa, areia fina medianamente compactada	105-410
Solos argilo-arenosos compactos	205-275
Areia fina fofa, solos arenosiltosos medianamente compactos	100-205
Argila firme ou rígida	68-135
Areia fofa saturada, argila média	34-68
Solos de mangue, turfa	0-34
Depósitos de estéril fofo a medianamente compacto	34-515

Fonte: Adaptado de TANNANT & REGENSBURG (2001)

Como cada camada tem uma função específica, é necessário escolher o material adequado a sua aplicabilidade. Para o revestimento é necessário se atentar a quesitos operacionais como aderência, resistência ao rolamento e controle de poeira já que ele é que vai receber a maior carga, um dos materiais utilizados é a canga que possui boa sustentação e compactação. Na sub-base é comumente utilizado material siltoso ou arenoso e na base mais grosseiro. Os materiais utilizados normalmente não possuem controle é utilizado material granulométrico, dessa forma é feito o controle visual, não deixando que o material passe 2/3 da altura da camada (MASETTI, *et al.*, 2011).

Segundo Bernucci (2008) a classificação dos materiais de cada camada é feita de acordo com o comportamento sob esforços e são divididos em 3 classes, sendo elas: materiais granulares e solos, materiais cimentados, e materiais asfálticos. A

Tabela 3 mostra os materiais de acordo com a sua classe.

Tabela 3: Classificação dos materiais para base.

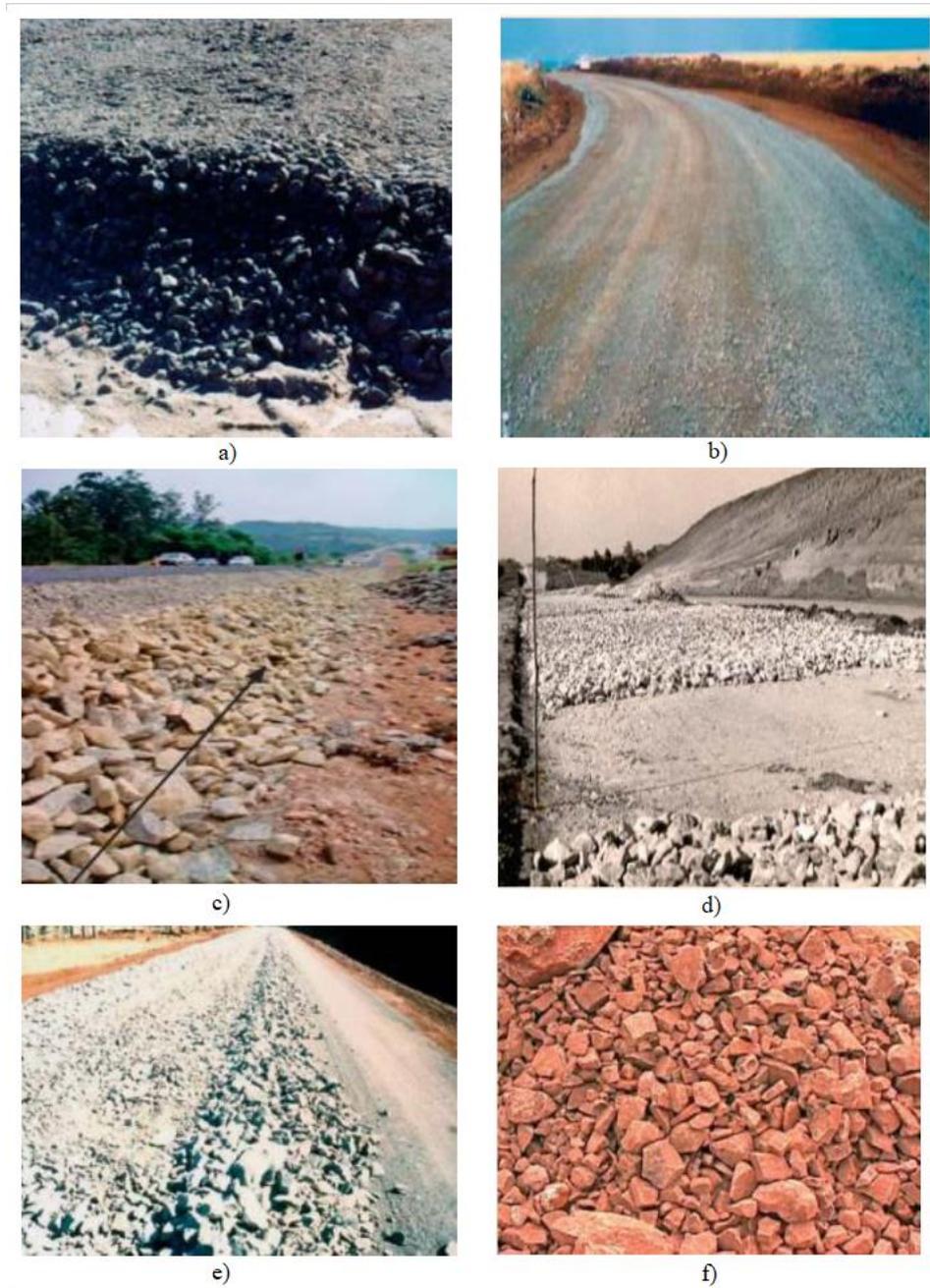
Classe	Materiais
Granulares e solo	Brita Graduada e bica corrida; macadame hidráulico; macadame a seco; misturas estabilizadas granulometricamente; solo agregado; solo natural; solo melhorado com cimento ou cal
Cimentados	Brita graduada tratada com cimento; solo cimento; solo-cal; concreto rolado
Asfálticas	solo-asfalto; solo-emulsão; macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado

Fonte: Adaptado de BERNUCCI *et al.* (2010)

Bernucci (2008) define que os materiais granulares são aqueles que não possuem coesão e baixíssima resistência à tração. Os solos coesivos conseguem resistir principalmente à compressão, em função da fração fina de seu material. Já Masetti *et al* (2011), conceitua os materiais granulares como, materiais resistentes à deformação sob carregamento, permitindo boa tração alta aderência e baixa resistência ao rolamento.

A Figura 6 e Figura 7 apresentam os principais materiais granulares, solos e solo-agregados empregados em bases, sub-bases ou reforços de subleito.

Figura 6: Principais materiais granulares, solos e solo-agregados empregados em bases, sub-bases ou reforços de subleito: (a) Brita graduada simples, b) Bica Corrida, c) Rachão, d) Macadame hidráulico, e) Macadame seco, f) Macadame seco: detalhe da graduação).



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

Figura 7: Principais materiais granulares, solos e solo-agregados empregados em bases, sub-bases ou reforços de subleito: a) Solo-brita descontínuo: mistura em pista, b) Detalhe da camada compactada, c) Solo-brita, d) Solo-

areia: mistura em pista, e) Argila arenosa laterítica: trincas devido à perda de umidade da camada compactada, f) Solo arenoso fino laterítico LA: trincas devido à perda de umidade da camada compactada.



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

3.5.3 Requisito de compactação

A compactação é feita por meio da aplicação de vibração, impacto ou pressão fazendo com que o solo tenha um aumento do peso específico, os equipamentos comumente utilizados são o rolo pé-de-carneiro, rolo vibratório liso ou rolo vibratório corrugado. É de fundamental importância a aplicação desse passo, já que quanto mais compactado menor será a deformação do solo, aumentando assim a vida útil do pavimento (DNIT, 2006)

Segundo o Manual de Estrada de Mina da Vale, as camadas da base, sub-base e revestimento não devem ultrapassar 20 cm de espessura durante a compactação. Sendo que a

cada 20 cm de camada, se torna necessário repetir a compactação até que o material não sofra mais compressão devido ao peso do rolo (Kaufman & Ault, 1977 *apud* MASETTI *et al.*, 2011).

3.5.4 Técnicas de tratamento contra o pó

Com o tráfego de equipamento nas estradas e acessos de uma mina é comum que o material entre em suspensão, principalmente quando o material está seco. A geração dessa poeira pode trazer muitos danos a operação já que reduz a visibilidade e a qualidade do ar, deixando o ambiente perigoso e atrapalhando a produtividade. Outra consequência é manutenção prematura dos equipamentos já que a poeira penetra nos componentes mecânicos e deteriora mais rápido o sistema (MASETTI, 2011).

A forma mais simples para contornar esse problema é a aspersão de água por meio de caminhões pipas ou por meio de sistemas de aspersão fixos. Dessa forma, a água ajuda a manter a compactação e reduz a perda de material, reduzindo também a manutenção (SOUSA, 2011).

Quando apenas com a aspersão de água o resultado não é satisfatório Masetti (2011) conceitua que líquidos estabilizadores e polímeros são também usados na redução de poeira dando maior coesão e impermeabilidade ao revestimento. Os resultados com essa aplicação permitem redução de poeira e também a formação de lama em períodos chuvosos.

3.6 Manutenção, readequação e segurança

Conforme o uso da estrada é normal ocorrer desgastes, dessa forma é preciso fazer a manutenção para conservar a superfície e manter os padrões de rolamento e de escoamento da água superficial na via. Com a realização das atividades de manutenção é assegurado o a redução de custos operacionais da frota, além de prolongar a vida útil da estrada (MASETTI, 2011).

MASETTI *et al.* (2011) ressalta que as condições da superfície de uma via influenciam diretamente nos parâmetros de segurança, qualidade e custos de manutenção dos caminhões. De forma que, quanto maior a qualidade da via, menor será a deterioração da mesma e menor a frequência de manutenção necessária.

Para efetuar a conservação se faz necessário a classificação de cada manutenção, visto que para cada problema há uma tratativa. Dessa forma, o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), classifica algumas dessas manutenções como: conservação preventiva periódica, melhorias e ações emergenciais, conservação corretiva rotineira, remendos, reforço estrutural e restauração.

A Tabela 4 juntamente com a Figura 8 e Figura 9 apresentam os defeitos mais comuns nas estradas de mina, segundo Masetti *et al.* (2011) e Reis (2014)

Tabela 4: Defeitos mais comuns em estradas de mina.

Defeito	Natureza	Descrição
Seção transversal inadequada	Deterioração da superfície	Seção transversal da estrada não possui a inclinação necessária para o direcionamento da água precipitada
Poeira		Desprendimento de material fino do revestimento da estrada e formação de uma nuvem de material em suspensão quando da passagem de veículos
Caráter pedregoso		Observação de material granular na superfície da estrada evidenciada pela perda de finos
Perda de agregados grossos		Material granular solto sobre a superfície da estrada
Estrada escorregadia		Se úmida: grande quantidade de finos se comparada à quantidade de agregados grossos; Se seca: ausência de material fino coesivo
Afundamento por trilha de roda	Deformação da superfície	Deformação permanente nos locais onde os pneus dos veículos passam
Corrugações		Série de ondulações perpendiculares à direção do tráfego
Depressões		Áreas baixas localizadas
Buracos		Cavidades de pequenas dimensões na pista
Pontos fracos		Áreas onde o material da estrada ou do subleito se apresentam enfraquecidos devido à drenagem deficiente

Fonte: Masetti *et al.* (2011) e Reis (2014) *apud.* Oliveira Filho *et al.* (2011).

Figura 8: Defeitos comuns nas estradas de mina: a) Buracos, b) Poeira excessiva



a)



b)

Fonte: Oliveira Filho *et al.* (2011).

Figura 9: Defeitos comuns em estradas de mina - c) Material solto d) Borrachudo e) Seção transversal inadequado f) Trilhas de rodas



c)



d)



e)



f)

Fonte: Oliveira Filho *et al.* (2011).

Os defeitos apresentados nas imagens acima são totalmente ligados ao pavimento, mas a manutenção abrange também os elementos de drenagem, leiras de segurança, entre outros. Além de ser tanto para fins corretivos quanto para fins preventivos (REIS, 2014).

Recomenda-se a realização de estudos geotécnicos da jazida onde serão extraídos o solo utilizados para realização de execução e manutenção de estradas não pavimentadas afim de

averiguar as propriedades e capacidade de suporte, servindo como base de estudo para o planejamento da manutenção da via (PINHIRO *et al.*, 2020).

3.7 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), comumente chamado de ensaio CBR, tem como objetivo determinar capacidade de suporte de um solo compactado, auxiliando no dimensionamento de pavimentos rodoviário. Com o ensaio é possível definir o índice de expansibilidade do solo, permitindo calcular a perda de resistência com a saturação (DAS *et al.*, 2019).

Segundo Masetti (2016) o cálculo do CBR é dado através da Equação 1. Onde a Pressão encontrada se dá pela pressão que um pistão exerce na amostra de solo e a Pressão padrão pela pressão que o pistão exerce em uma amostra referencial padrão.

$$CBR(\%) = \frac{\text{Pressão encontrada}}{\text{Pressão padrão}} * 100 \quad (1)$$

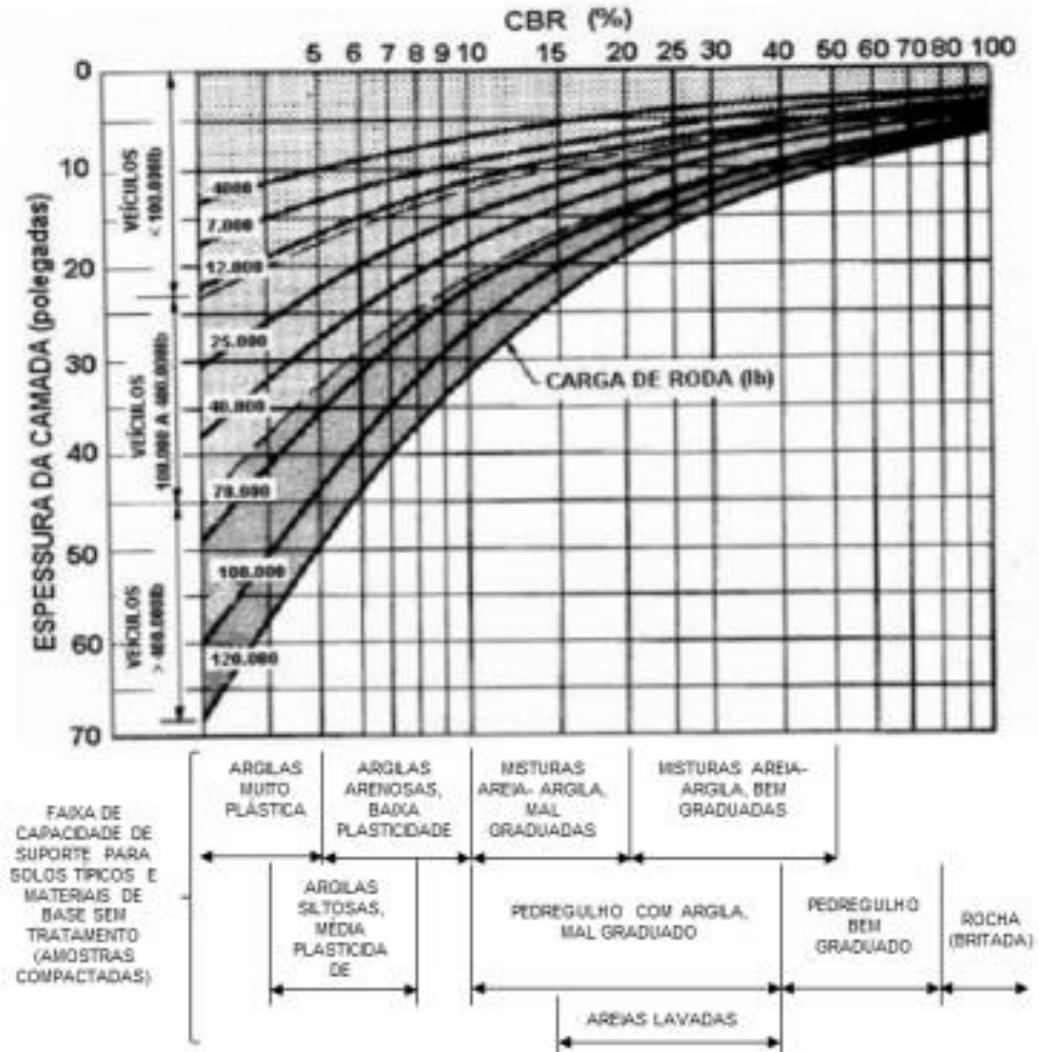
A classificação recomendada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2006):

- Subleito: $CBR \geq 2\%$ e $\text{expansão} \leq 2\%$;
- Reforço de subleito: CBR maior que o do subleito e $\text{expansão} \leq 1\%$;
- Sub-base: $CBR \geq 20\%$ e $\text{expansão} \leq 1\%$;
- Base: $CBR \geq 80\%$ e $\text{expansão} \leq 0,5\%$.

A definição da espessura do pavimento e de suas respectivas camadas são dadas a partir do valor do CBR. Caso o CBR do subleito for $< 2\%$, ele deve ser substituído por um material que tenha $2\% \leq CBR \leq 20\%$ com pelo menos 1 metro de espessura (DAS, 2019).

O ábaco de CBR que é comumente utilizado para realização do dimensionamento do pavimento é exposta na Figura 10 abaixo:

Figura 10: Ábaco de CBR



Fonte: OLIVEIRA *et al.* (2010)

4 METODOLOGIA

No presente capítulo será exposto como procedeu o dimensionamento e a aplicação da pavimentação denominada “blindagem” nas estradas de acesso de mina no Complexo Mariana, da mineradora Vale S.A. O dimensionamento e aplicação ocorreu após consultas a materiais com a temática “pavimentação de estradas”.

O estudo de aplicação de material agregado para manutenção de acessos de mina buscou-se estudar princípios de referências teóricas sobre o tema, aliando-os às práticas adotadas em campo.

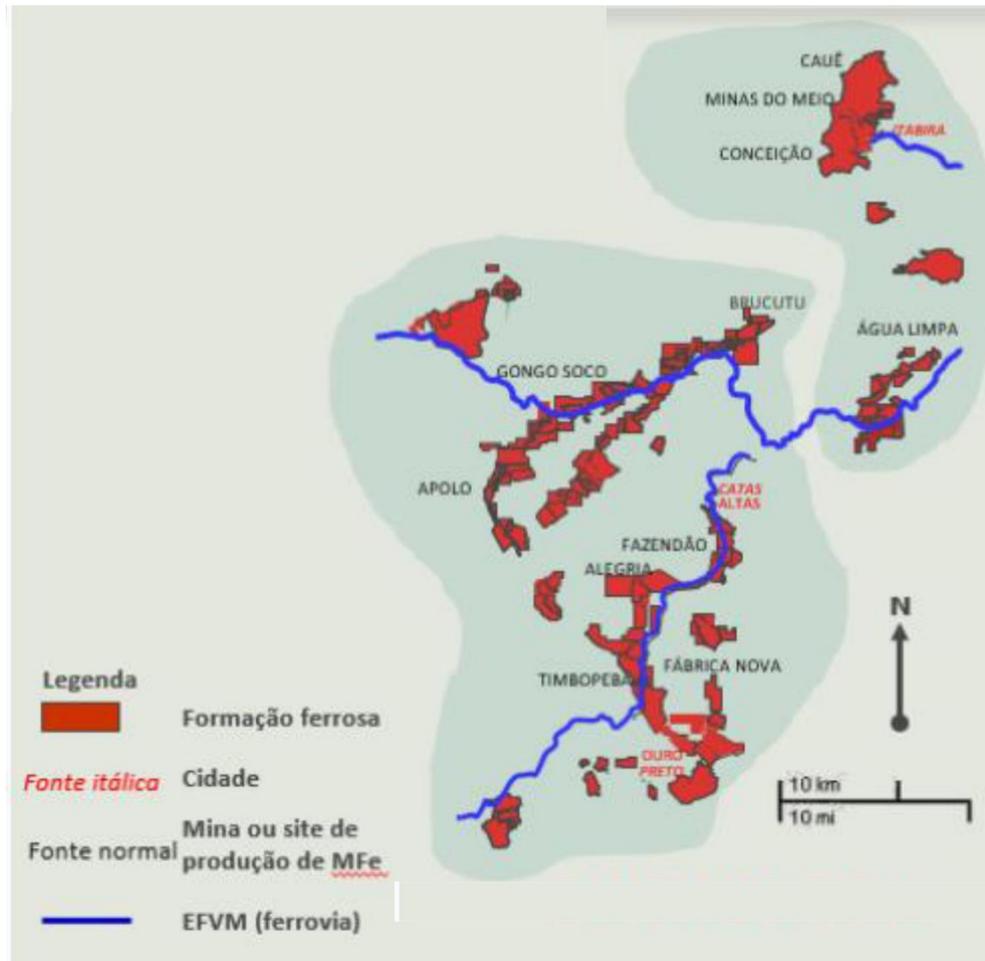
4.1 Local do objeto do estudo

A operação de blindagem de acessos objeto deste trabalho, está localizada no Complexo Mariana – Minas Gerais, onde foram considerados inicialmente alguns trechos mais críticos para aplicação da técnica, no final de 2021 cerca de 14 km de acessos do Complexo já haviam sido blindados. Os acessos são projetados para garantir a movimentação dos materiais provenientes da operação, seja minério, estéril, rejeito e produtos entre minas e suas instalações, apoio logístico geral, e deslocamentos de veículos leves.

A Vale é uma das maiores mineradoras líderes de mercado, presente em cerca de 30 países nos setores minerário, energia, siderurgia e logístico – com ferrovias, terminais e portos; e conta com infraestrutura de última geração (VALE, 2021 apud SANTOS, 2021;).

Atuação da Vale abrange quatro corredores, no país, corredores: Norte, sul, sudeste e centro-oeste. As minas do Sul e Sudeste estão localizados no quadrilátero ferrífero – que é uma das principais produtoras de minério de ferro do mundo (ROSIÉRE, CHEMALE JR, 2000 apud SANTOS, 2021), conectados através de modal ferroviário a portos no Rio de Janeiro e Espírito Santo. O Complexo Mariana está localizado no Sistema Sudeste, formado por dois complexos: Mariana, Brucutu e Itabira (Figura 11).

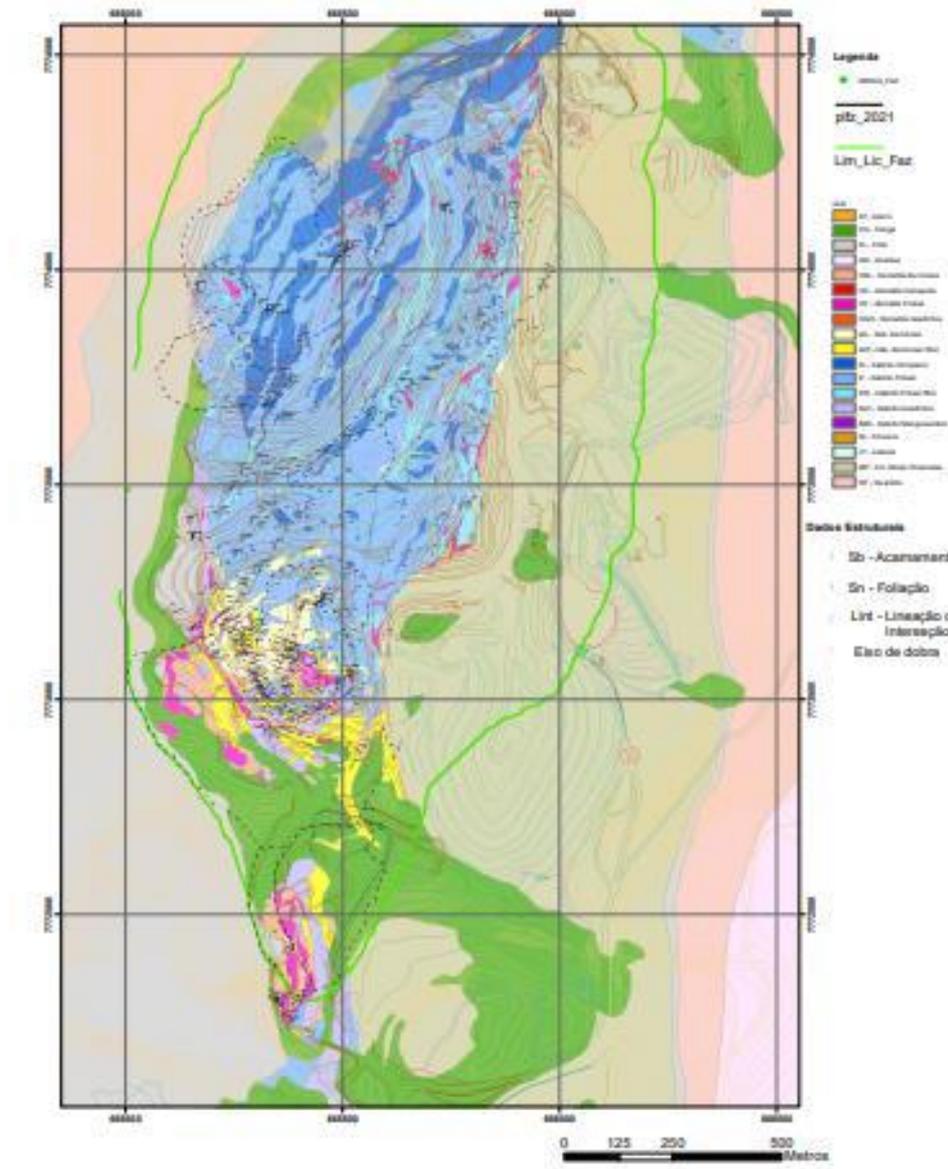
Figura 11: Sistema Sudeste, Complexo Mariana- MG.



Fonte: Vale (2021) apud Santos (2021).

Dentro do Complexo Mariana compreende-se as minas Alegria, Fazendão, Timbopeba e Fábrica Nova, esta área possui formações ferríferas de hematita, hematita goethítica, itabirito friável rico, compacto, itabirito argiloso rico, itabirito goethítico, itabirito argiloso, itabirito manganêsífero e canga. Sendo a predominância de formação de itabirito compacto, friável e friável rico demarcados do azul mais escuro ao mais claro, respectivamente, representado na Figura 12 (SANTOS, 2021).

Figura 12: Mapa geológico da Mina do Fazendão – MG.



Fonte: Vale (2021).

4.2 Definição do material da base, sub-base e revestimento

A partir dos materiais disponíveis tanto dentro do complexo quanto no mercado externo, foi realizado um estudo para averiguar a resistência do material. Foram feitos ensaios de abrasão “Los Angeles” a fim de selecionar o material para a camada de base. Dessa forma foi selecionado os seguintes materiais:

- Sub-base: Itabirito bem graduado

- Base: Pedra de mão Gnaisse
- Revestimento: Gnaisse Brita “3” e bica corrida.

Brita “3”

Características: material com dimensões entre 25 a 50 mm. Material destinado para o revestimento do acesso

Figura 13: Brita 3



Fonte: Autor

Pedra de Mão:

Característica: material com dimensões entre 76 a 120 mm

Figura 14: Pedra de mão



Fonte: Autor

Bica corrida ou brita corrida:

É o conjunto de pedra britada, pedrisco e pó-de-pedra, sem graduação definida, obtido diretamente do britador, sem separação por peneiração.

Figura 15 – Brita corrida

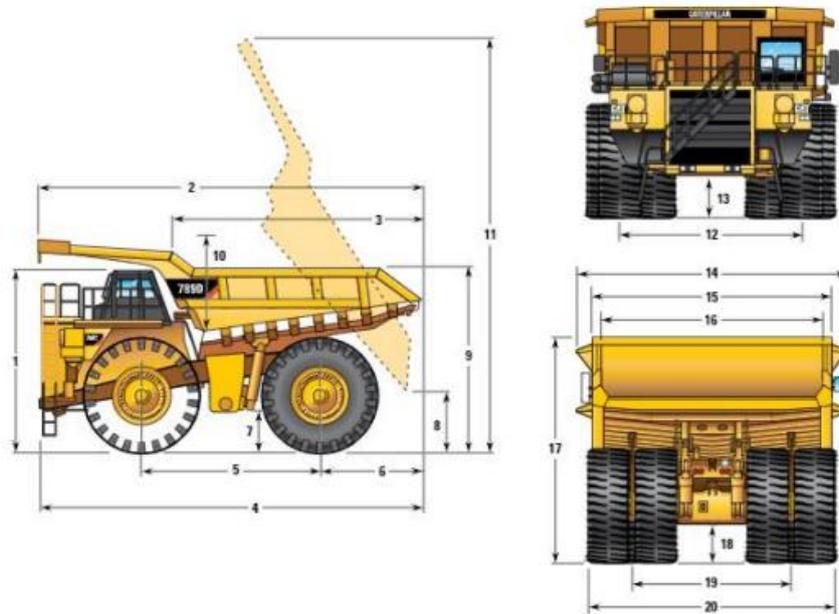


Fonte: Autor

4.3 Dimensionamento do pavimento

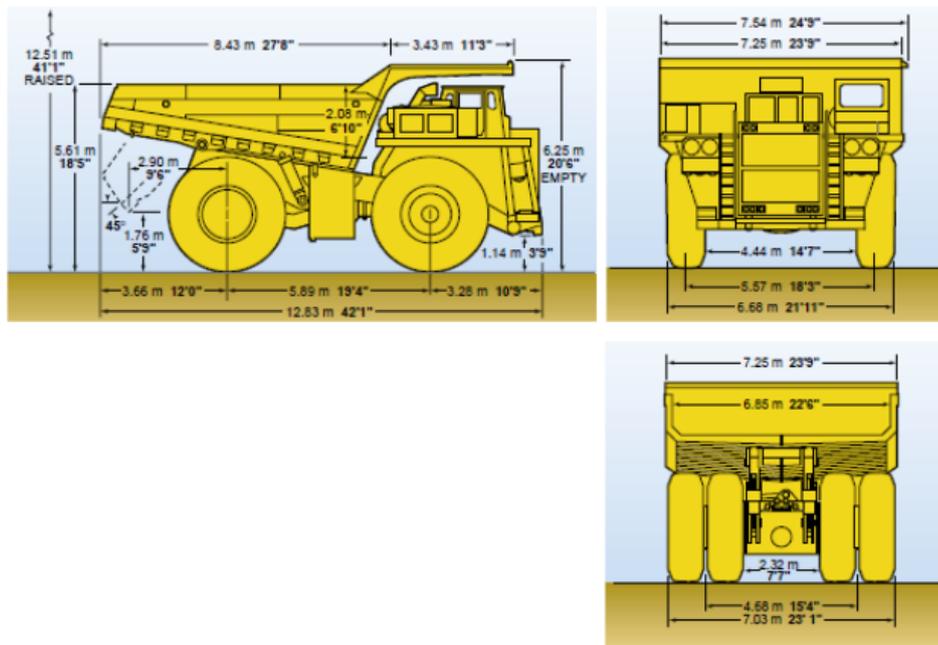
O dimensionamento foi realizado utilizando o Manual de Estradas de Mina da Vale, que usa o método empírico CBR. Como base para cálculo foi utilizado os maiores caminhões que trafegam na via, sendo eles: CAT 789 D (Figura 16) e o Komatsu 730 E (Figura 17), tendo-se adotado o pior cenário possível para o subleito considerando o CBR=5%.

Figura 16: Caminhão CAT 789D



Fonte: CATERPILLAR (2011)

Figura 17: Caminhão Komatsu 730E



Fonte: KOMATSU MINING SYSTEMS (2001)

Diante das particularidades geológicas em regiões distintas do Complexo foram feitos ensaios de caracterização do subleito dos acessos as minas do complexo. Obtendo-se os resultados do CBR, representados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de CBR.

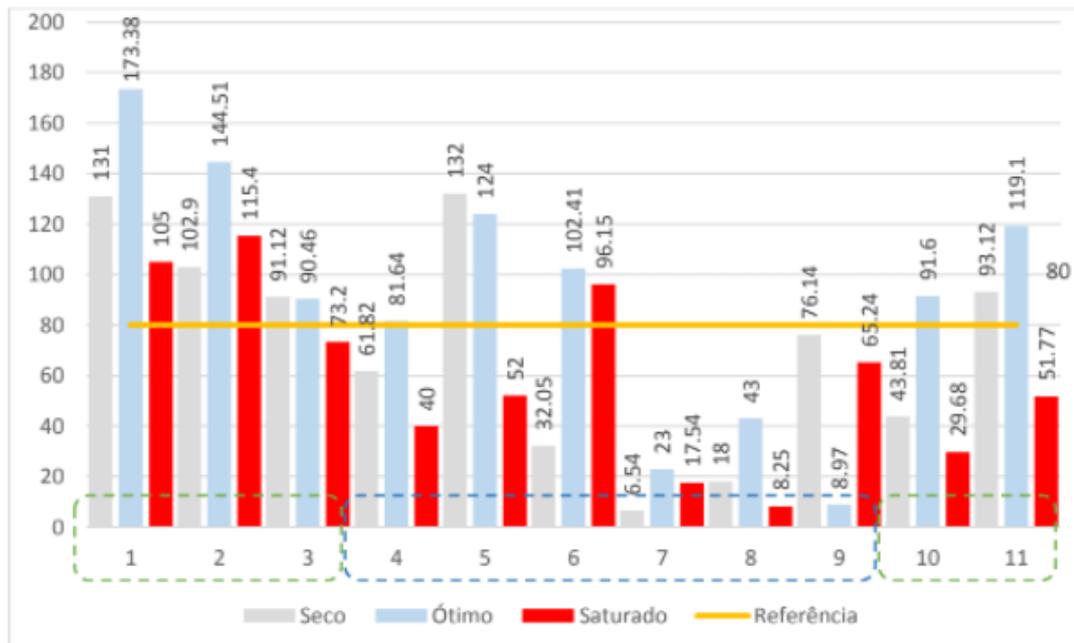
Amostras	Seco	Ótimo	Saturado
1	131	173,38	105
2	102,9	144,51	115,4
3	91,12	90,46	73,2
4	61,82	81,64	40
5	132	124	52
6	32,05	102,41	96,15
7	6,54	23	17,54
8	18	43	8,25
9	76,14	8,9	65,24
10	43,81	91,6	29,68
11	93,12	119,1	51,77

Fonte: Vale (2021) *apud* Santos (2021).

Os resultados de CBR variam entre 8,97% e 173,38%, em estado ótimo, o que possibilita, inclusive, ser realizado ajustes necessários para definição das espessuras de camadas do pavimento levando em consideração a capacidade de suporte do subleito, que são aptos para receber esforços diretamente no subleito quando apresentam CBR igual ou maior que 80%.

Com base na literatura o CBR (Figura 18) de projeto foi definido em 80%. Entretanto, alguns trechos da via de acesso possuem subleito com baixa capacidade de suporte, que diante da ação de cargas advindas do tráfego deformam dando surgimento as patologias como buracos, trilhas de roda e corrugações.

Figura 18: Resultado gráfico do CBR dos acessos do complexo



Fonte: Autor

Já o resultado da análise granulométrica, representado abaixo. A análise granulométrica aponta predominância de solo arenoso com presença de parcela significativa de solos finos, o que possibilita também o tratamento superficial com uso aditivo químico de origem orgânica. Resultados de classificação do solo. Granulometria por Peneiramento e Sedimentação – Designação do Solo:

- Areia Argilo Siltosa de Cor Marrom com pouco Pedregulho
- Areia Silto Argilosa de Cor Marrom com Pedregulho
- Areia Siltosa com vestígios de Argila de Cor Cinza com Pedregulho
- Areia Siltosa com vestígios de Argila de Cor Cinza com pouco Pedregulho
- Areia Siltosa com vestígios de Argila de Cor Marrom com Pedregulho
- Areia Siltosa com vestígios de Argila de Cor Cinza com pouco Pedregulho

Para seleção dos materiais da base foram realizados ensaios de abrasão “Los Angeles”. Também foram analisados os custos acarretados pelo uso dos materiais disponíveis na própria mina. Foram adotados os seguintes materiais:

- Sub-base: itabirito (material encontrado no Complexo) ou gnaise,;

- Base: pedra-de-mão (material com dimensões entre 76 a 220 mm);
- Revestimento: brita “3” (material com dimensões entre 25 a 50 mm) e bica corrida (material com dimensões até 32 mm).

4.3.1 Obtenção do CBR

Para a definição da espessura total da camada de pavimento é preciso realizar o ensaio com o subleito da estrada. Já com os materiais selecionados para cada camada é feito o mesmo ensaio, com o intuito de usar os dados para o cálculo da espessura da camada.

4.3.2 Determinação da carga de roda A determinação da carga de roda é feita coletando os dados nos manuais dos veículos mais pesados que irão trafegar na via. Nesse processo é considerado o peso do caminhão carregado e multiplicado pela distribuição percentual do caminhão, que neste caso é 33,3% no eixo dianteiro e 67,7% no eixo traseiro. Vale ressaltar que no eixo traseiro são 4 pneus e no eixo dianteiro apenas 2. A Tabela 6 mostra as especificações de cada caminhão:

Tabela 6: Dados dos caminhões

Modelo	CAT 789D	Komatsu 730E
Peso bruto do veículo	32319 Kg/ 715.000 lb	324318 kg / 715.000 lb
Carregamento máximo no eixo dianteiro	117975 lb	109064,5 lb
Carregamento máximo no eixo traseiro	119226,25 lb	124217,75 lb

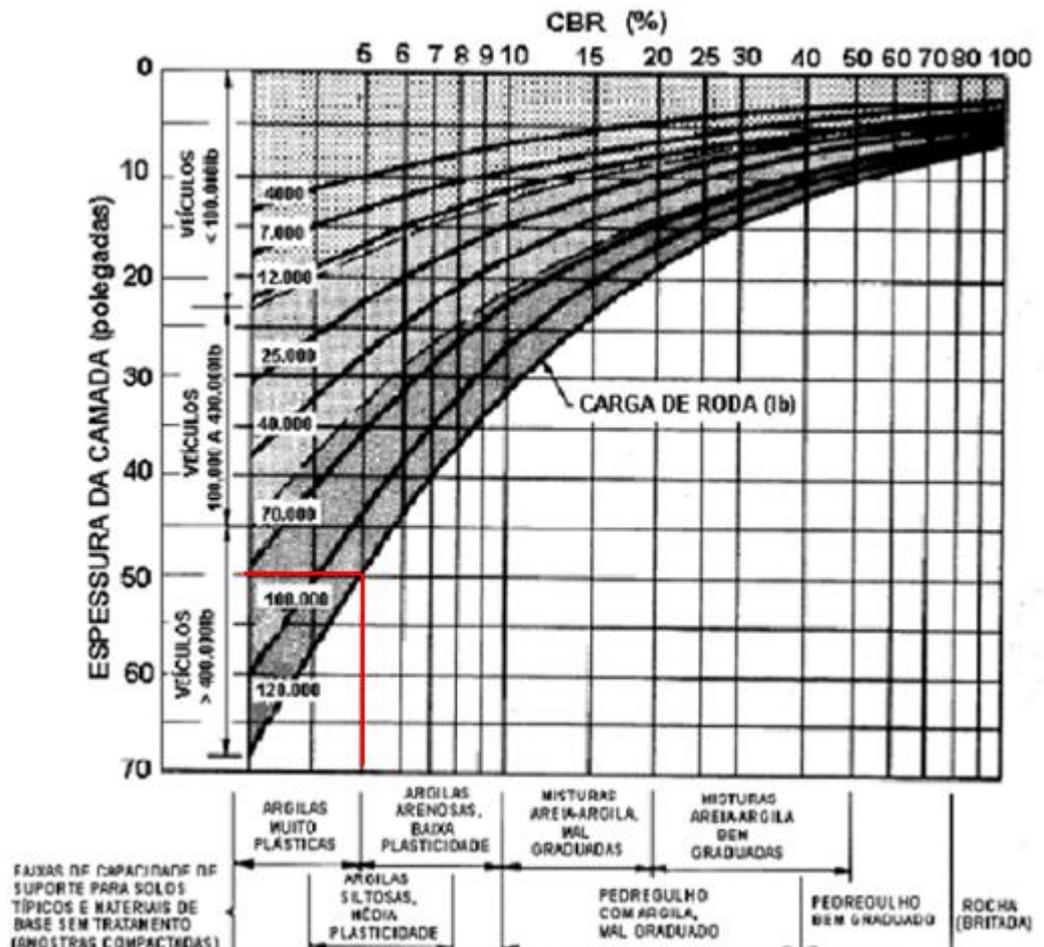
Fonte: Adaptado de CATERPILLAR (2011) e KOMATSU MINING SYSTEMS (2001)

A partir da tabela é possível observar que o maior carregamento no eixo traseiro é do caminhão Komatsu 730E. Logo, será adotado a carga de roda de 125.000 lb.

4.3.3 Determinação da espessura total da camada

Para a determinação da espessura total da camada, foi considerado um subleito formado por argila com $\text{CBR} = 5\%$. Dessa forma, usa-se o ábaco de forma a determinar a altura total a partir da interseção da carga de roda com o CBR adotado. Na Figura 19 é possível observar a interseção onde foi considerado o valor de 50 polegadas (127cm):

Figura 19 - Determinação da espessura total



Fonte: adaptado OLIVEIRA *et al.* (2010)

4.3.4 Determinação da espessura da camada de sub-base

A partir do CBR do material disponível que nesse caso foi adotado o itabirito friável ($\text{CBR} = 30\%$) e a carga de roda, calcula-se por meio do ábaco a espessura entre o topo da camada de sub-base e o topo da camada de revestimento. A partir da interseção no ábaco foi definido que a espessura total da camada é de 32 polegadas (80cm).

4.3.5 Determinação da espessura da camada de base

A partir do CBR do material escolhido e a carga de roda é feita a interseção e encontrado a altura entre o topo da camada de base e a superfície da estrada. A altura encontrada foi de 11 polegadas (28 cm).

4.3.6 Determinação da espessura da camada de revestimento

Com a espessura total calculada é feita a subtração da base e da sub-base de forma a encontrar a espessura do revestimento. Dessa forma, foi encontrado o valor de 7 polegadas (18 cm) para o revestimento.

Após a realização da obra, constatou-se que a resistência a rolamento estava muito alta, logo, foi aplicado uma pequena camada de material fino de gnaíse, onde encontrou-se uma superfície lisa e sem penetração (Figura 20).

Figura 20: Espessura das camadas



Fonte: adaptado de MASETTI (2011)

4.4 Aplicação

Para realizar a construção do pavimento foi feito o mapeamento de pontos extremamente importantes que impactam a segurança das operações nas Minas de Fazenda,...

Alegria, Fábrica Nova juntamente com a equipe de operação. O trecho definido para a aplicação foi o trecho: Apanhador de água do Dicão até a pilha de Rom da IB4 demarcado na Figura 21.

Figura 21: Trecho definido para a aplicação



Fonte: Autor via Google Earth.

Para a execução o trecho foi subdividido em 2 menores trechos de aproximadamente 500m, e podem ser observados na Figura 22 e Figura 23.

Figura 22: Trecho 1



Fonte: Autor via Google Earth.

Figura 23: Trecho 2



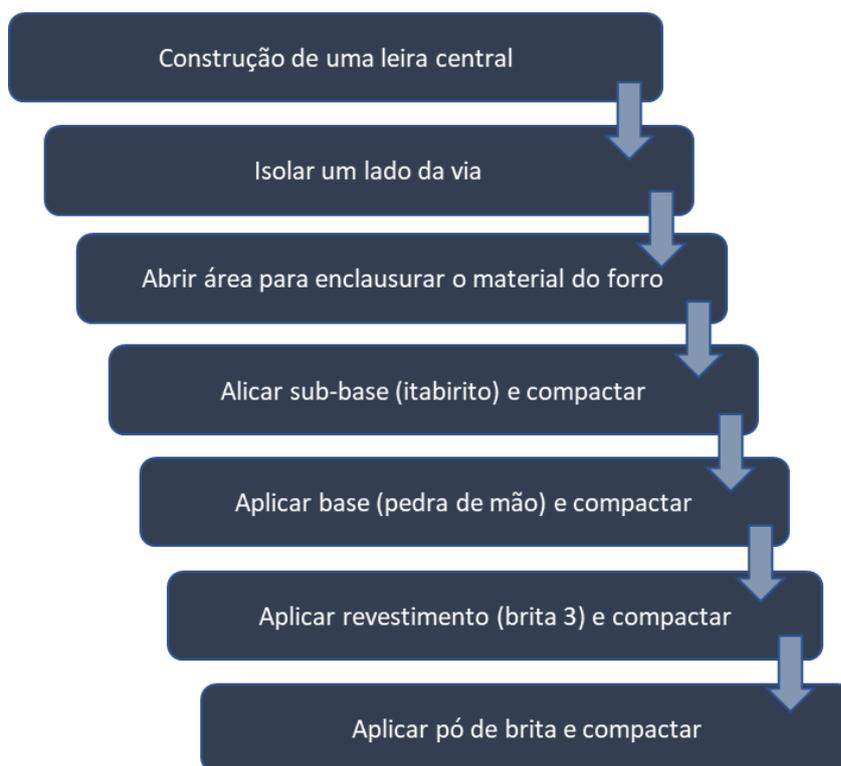
Fonte: Autor via Google Earth.

Os recursos atribuídos para realização da obra foram:

- Caminhões basculantes de PP (Scania);
- 1 Pá Mecânica porte CAT 988;
- 1 Trator de pequeno Porte D61;
- 1 Escavadeira porte CAT 336;
- 1 Motoniveladora porte CAT 140 PP;
- 1 Caminhão pipa;
- Rolo compactador liso, 12t.

O processo construtivo do acesso foi realizada seguindo os passos exemplificados abaixo (Figura 24):

Figura 24: Passo a passo para o processo construtivo



Fonte: Autor

Foi construída uma leira central visando a segurança dos caminhões e das pessoas que estavam realizando a obra. Com o isolamento de um lado da via foi escavado 1,27m, com o intuito de retirar o solo mole e abrir espaço para enclausurar o material de forro. Foi aplicado a sub-base (itabirito) com 80cm de altura, a base (pedra de mão) com 28cm de altura, o revestimento (brita 3) com 18cm de altura e uma fina camada de pó de brita afim de melhorar as condições de rolamento. Vale ressaltar que após a aplicação de cada camada o rolo compactador era passado até não haver significativa compactação (Figura 25).

Figura 25: Execução da blindagem



Fonte: Autor

A medida que atividade se desenvolvia e com a experiência adquirida, duas etapas foram ajustadas para melhoria do resultado:

- 1 Aplicação de uma camada superficial de “Bica corrida” sobre o revestimento de brita 3, a fim de melhorar a resistência ao rolamento.
- 2 Aplicação do rolo compactador liso 12t em todas as etapas de formação das camadas de no máximo 20 cm da sub-base, base e revestimento.

4.4.1 Manutenção dos acessos após melhoria no processo construtivo

A manutenção de rotina é realizada em estradas de transporte de minas quase diariamente, dependendo da funcionalidade da estrada e do volume de tráfego. Os principais objetivos são: restaurar a funcionalidade da estrada a um nível adequado para uma viagem eficiente do veículo com o objetivo de aumentar a produtividade e minimizar os custos totais do usuário da estrada e conservar a integridade do curso de transporte da estrada retornando ou redistribuindo a superfície do cascalho (THOMPSON; VISSER, 2003).

Com processo de aplicação do processo construtivo, reduziu drasticamente a frequência de manutenções nestes trechos, que voluntariamente foram escolhidos por serem os mais críticos quanto a qualidade e necessidade de manutenção.

Os operadores de motoniveladoras passaram por um treinamento específico para manter os trechos blindados observando os cuidados para não retirar os materiais aplicados e apenas fazer os acertos de forma superficial retirando alguma ondulação, e ajustando as drenagens.

Quando necessário, alguma reposição do material do revestimento é feita em local definido, com limpeza, preparação e recomposição a das camadas as definições iniciais.

Placas de sinalização foram instaladas ao longo das vias identificando o início e término das áreas blindadas, afim de orientar aos operadores

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Estudo da velocidade média

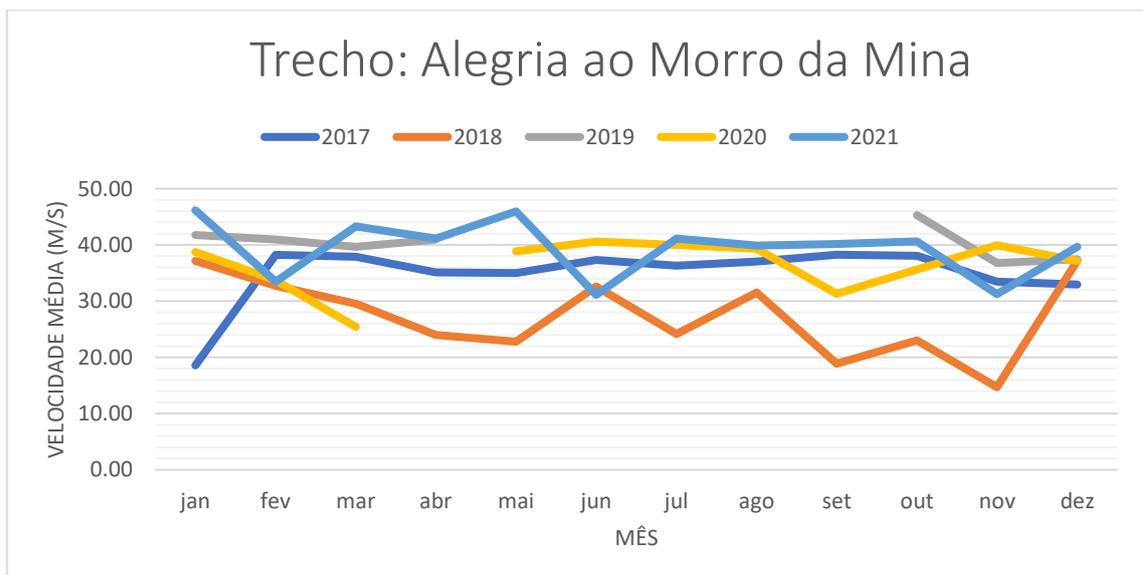
O objetivo foi avaliar um possível acréscimo da velocidade esperado para as áreas construídas a fim de buscar uma relação direta com aumento da produtividade. Correlacionando assim as boas condições de vias ao ganho de velocidade. Desta forma, foi realizado o levantamento da velocidade média para os anos de 2017 a 2021 para análise.

O período selecionado foi determinado com objetivo de que fossem contemplados os anos pré e pós-blindagem dos acessos, tornando-se possível realizar um comparativo das velocidades. Os dados foram fornecidos pelo departamento do Centro de Operações Integrada (COI), que realiza o controle dessas informações.

5.1.1 Trecho: Alegria ao Morro da Mina

Foi estudada a velocidade média do trecho Alegria ao Morro da Mina para os anos 2017 a 2021 (Figura 26).

Figura 26: Velocidade média mensal, 2017 a 2021. Trecho Alegria ao Morro da Mina.

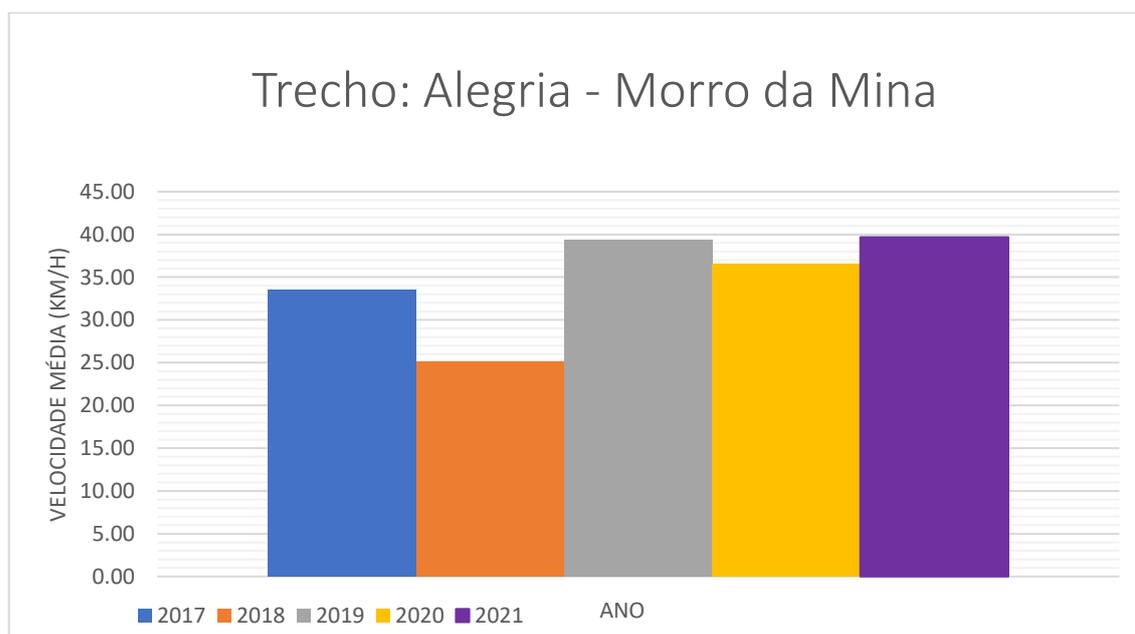


Fonte: Vale (2021)

Contudo, não foram obtidos dados de velocidade média para os meses de maio a setembro de 2019 e abril de 2020, observando-se assim uma lacuna para este período.

Na Figura 27, os resultados mostram que no ano de 2017 a velocidade média anual correspondia cerca de 33km/h, enquanto para o ano de 2018 a velocidade caiu para 25km/h. Para os anos seguintes observou-se um aumento da velocidade. Sendo que a blindagem de acesso realizada neste trecho teve sua execução em setembro de 2020.

Figura 27: Velocidade média anual - Trecho Alegria – Fazendão



Fonte: Vale (2021)

Para o período de 2017 a 2021, é possível identificar que o mês de novembro é o que aparece mais vezes relacionado a velocidade média mínima do ano. Já para a velocidade média máxima não se observa um padrão relacionado ao mês (Tabela 7).

Tabela 7: Velocidade média mínima e máxima no mês

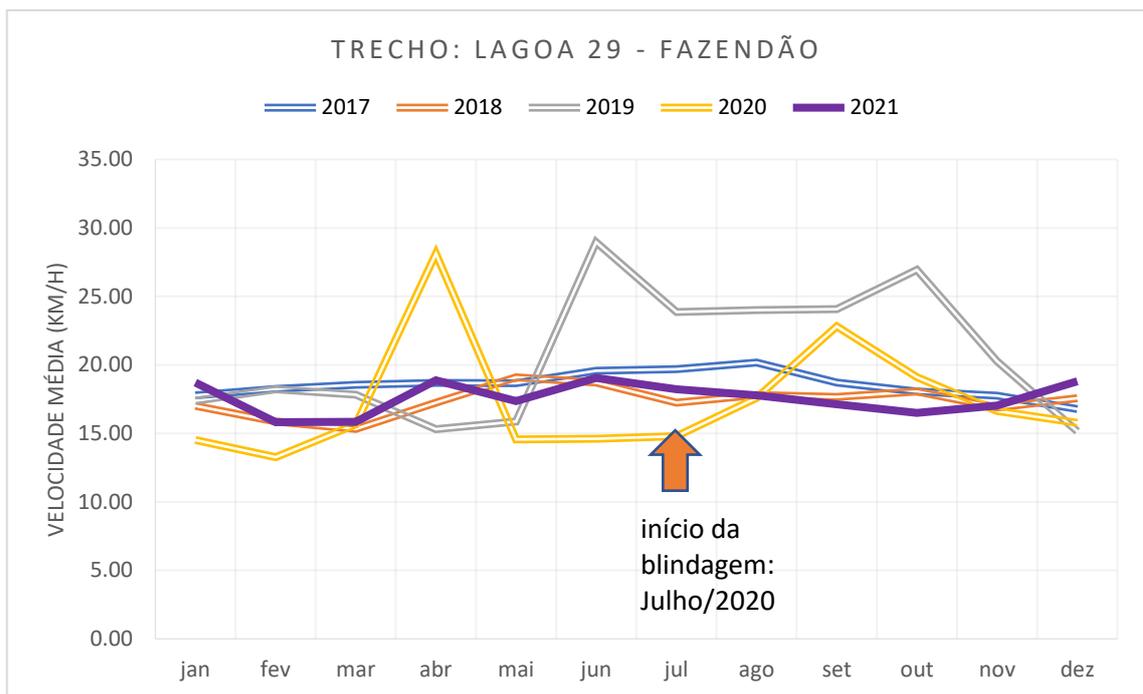
ANO	Velocidade média mínima		Velocidade média máxima	
	Mês	[Km/h]	Mês	[km/h]
2017	janeiro	18,58	fevereiro	38,21
2018	novembro	14,70	dezembro	37,18
2019	novembro	36,79	outubro	45,29
2020	março	25,44	junho	40,59
2021	novembro	31,24	janeiro	46,16

Fonte: Vale (2021)

5.1.2 Trecho Lagoa 29 a Fazendão

Para o mesmo período foram levantadas as velocidades do trecho Lagoa 29 a Fazendão (Figura 28).

Figura 28: Velocidade média mensal, 2017 a 2021. Trecho Lagoa 29 a Fazendão.



Fonte: Vale (2021)

A blindagem realizada neste trecho ocorreu em julho de 2020. Observa-se que para os anos de 2019 e 2020 foram registradas as maiores e menores velocidades médias. Já em 2021 o efeito “serrote” já se encontram em menor escala indicando uma menor variação da velocidade.

Quanto a velocidade média menor e maior do ano, nota-se na Tabela 8 abaixo que as menores velocidades se deram no início/final do ano, dezembro e fevereiro. Já para a velocidade média máxima não observa um padrão relacionado ao mês.

Tabela 8: Velocidade média mínima e máxima no mês no trecho Lagoa 29 a Fazendão

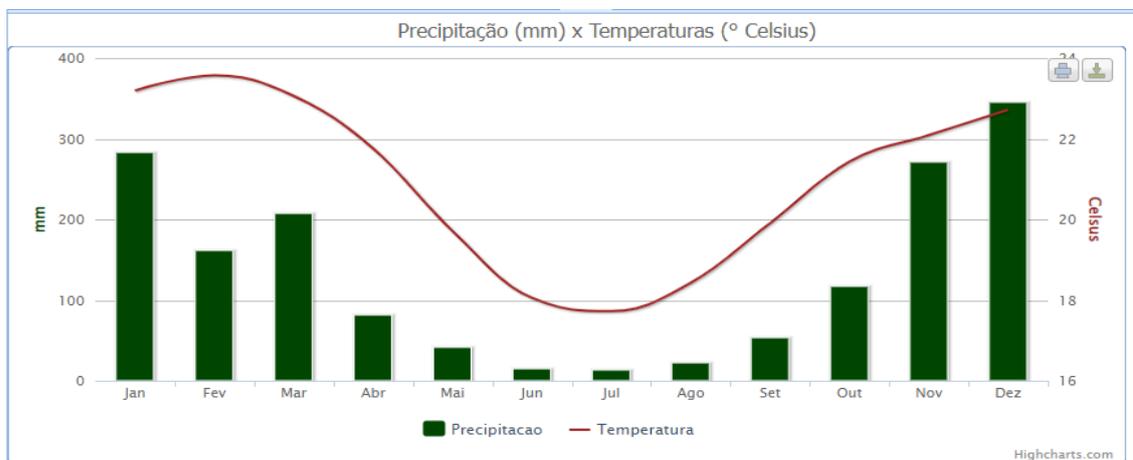
ANO	Velocidade média mínima		Velocidade média máxima	
	Mês	[Km/h]	Mês	[km/h]
2017	dezembro	16,77	setembro	20,17
2018	fevereiro	15,32	abril	19,09
2019	dezembro	14,51	abril	28,96
2020	fevereiro	14,57	janeiro	28,12
2021	junho	16,50	fevereiro	19,05

Fonte: Vale (2021)

5.2 Pluviometria local

Segundo INMET (2022) apud Lima (2022), o clima em Mariana, MG, é característico por ser quente e temperado. Havendo assim muito menos pluviosidade no inverno que no verão. É possível observar no gráfico abaixo as chuvas acumuladas mensais, em 2021, entre os meses de janeiro a março, bem como, de setembro a novembro apresentam valores expressivos.

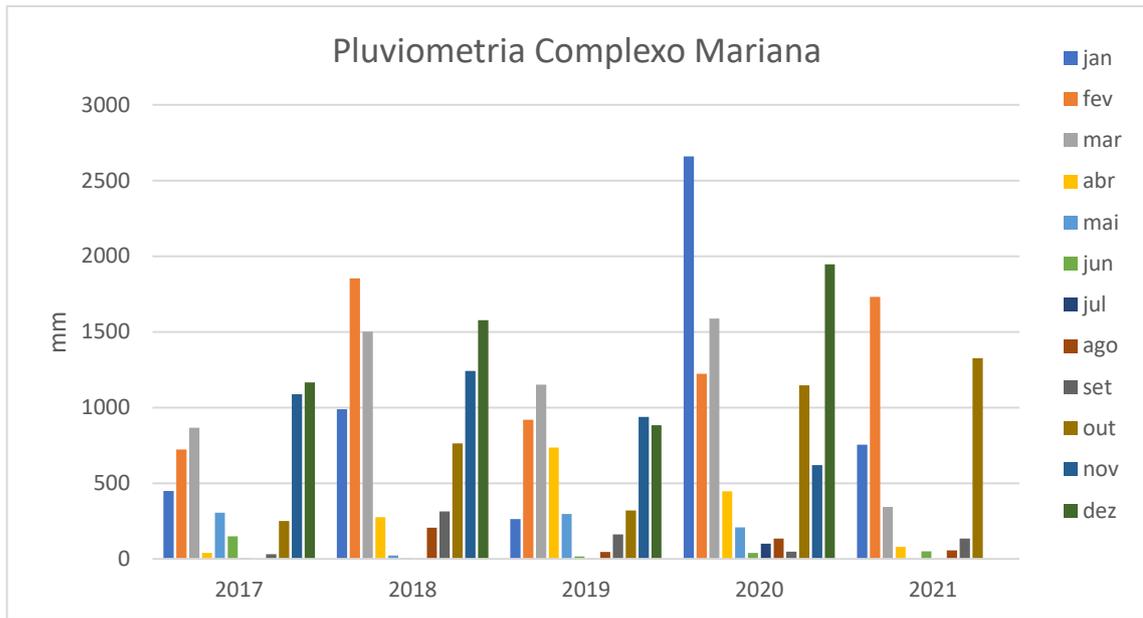
Figura 29: Gráfico de Precipitações acumuladas, em 2021, Mariana - MG.



Fonte: INMET (2022).

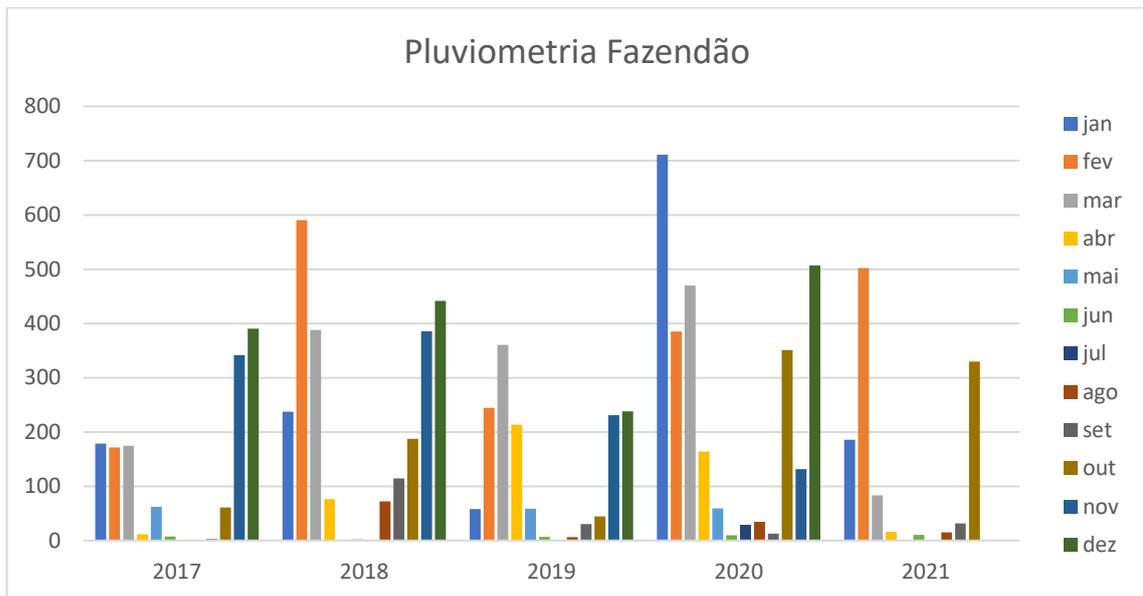
O Boletim Pluviométrico da Vale, Figura 4, em 2022, registrou para Mina Alegria, um acumulado anual de 1009 mm, entre os meses janeiro a março, aproximadamente 54% da média histórica para os mesmos períodos. Nas Figura 30 e Figura 31 abaixo é possível constatar que os meses de chuvas intensas ocorrem razoavelmente no primeiro trimestre e no último bimestre do ano.

Figura 30: Pluviometria – Complexo Mariana



Fonte: Vale (2022).

Figura 31: Pluviometria – Fazendão



Fonte: Vale (2022).

Quando relacionados os valores das médias máximas e mínimas anuais com os índices de pluviometria na região, é possível observar que para o Trecho Lagoa 29 a Fazendão, os meses de maior velocidade eram observados em períodos de seca entre 2017 a 2019, enquanto que em 2020 a 2021 já pode ser observado maiores valores durante o período de chuva. Podendo

ser um indicativo de melhoria de performance devido a maior qualidade das vias em tempo chuvoso com a utilização da blindagem.

Entretanto para o Trecho Alegria – Morro da mina, o mesmo não pode ser observado, já que em 2017 e 2018 as melhores velocidades medias se deram em épocas chuvosas. Mas ainda assim vê-se uma diferença entre os anos seguintes sendo que 2019 e 2020 as melhores velocidades se deram apenas em período seco enquanto em 2021 o período chuvoso foi novamente melhor.

5.3 Análise dos resultados

Os dados levantados não demonstram variação ou tendência clara de aumento de velocidade através dos anos, com ou sem a blindagem. Algumas possibilidades não identificadas nestes dados históricos levantados como possível alteração na geometria nos acessos ao longo do ano, mudança de frota, alteração sentido do fluxo carregado x vazio ao longo dos períodos podem impactar nestes resultados.

Em decorrência da falta de registro de informações e projetos para os acessos, constata-se a complexidade de parâmetros para que tivesse como resultado as justificativas da inconclusa dos ganhos.

Assim, um outro levantamento foi realizado buscando compreender os impactos da blindagem na velocidade média de transporte. Foram escolhidos trechos atuais com as mesmas características geométricas para medição considerando as seguintes premissas:

- Gradiente médio das rampas;
- Mesma largura dos acessos;
- Proximidade de localização;
- Disponibilidade de medição do mesmo equipamento nos 2 cenários.

Para o levantamento destes dados foi utilizado sistema de monitoramento de alta precisão chamado MEMs da empresa Michelin que gera dados online de temperatura, pressão, velocidade, localização, entre outros, já instalados nos equipamentos de mina para monitoramento de pneus e configurados para esse levantamento. Da Figura 32 a Figura 35 é possível ver a aplicação do monitoramento em conjunto com seus resultados.

Figura 32: Trecho sem blindagem



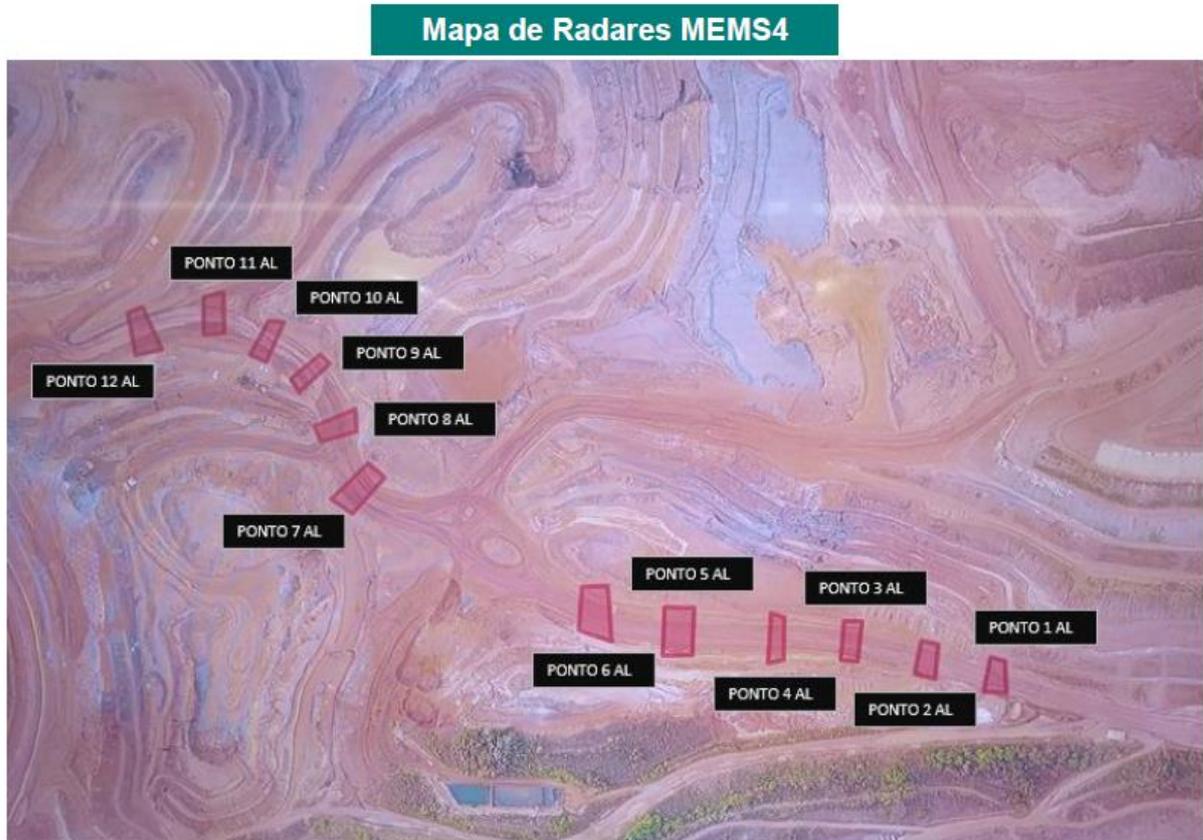
Fonte: Autor

Figura 33: Trecho com Blindagem



Fonte: Autor

Figura 34: Mapa com a localização dos radares MESMS4



Fonte: Autor

Figura 35: Resultados das análises com o MEMS4

Análise					
Dados Coletados					
22855 alertas					
	Total de Alertas	Média Maior Velocidade	Média Menor Velocidade	Média Geral Velocidade	
Trecho sem Blindagem em plano	5001	57 km	9 km	41 km	
Trecho sem Blindagem em rampa	10503	58 km	9 km	37 km	
Trecho com Blindagem em plano	4068	58 km	8 km	43 km	
Trecho com Blindagem em rampa	3283	58 km	7 km	36 km	

Análise Ponto a Ponto					
	Total de Alertas	Média Maior Velocidade	Média Menor Velocidade	Média Geral Velocidade	
Plano com Blindagem	Ponto 1	800	57 km	15 km	43 km
	Ponto 2	815	57 km	11 km	44 km
	Ponto 3	817	57 km	11 km	43 km
	Ponto 4	819	57 km	13 km	43 km
	Ponto 5	817	58 km	8 km	44 km
Rampa com Blindagem	Ponto 6	818	56 km	12 km	42 km
	Ponto 7	813	54 km	10 km	36 km
	Ponto 8	816	53 km	7 km	33 km
	Ponto 9	818	55 km	11 km	32 km
	Ponto 10	818	57 km	12 km	38 km
Plano sem Blindagem	Ponto 1 AL	797	56 km	7 km	38 km
	Ponto 2 AL	845	55 km	6 km	39 km
	Ponto 3 AL	841	56 km	9 km	42 km
	Ponto 4 AL	832	57 km	10 km	42 km
	Ponto 5 AL	843	56 km	22 km	42 km
	Ponto 6 AL	843	55 km	15 km	41 km
Rampa sem Blindagem	Ponto 7 AL	1774	55 km	9 km	38 km
	Ponto 8 AL	1773	57 km	9 km	41 km
	Ponto 9 AL	1758	58 km	9 km	40 km
	Ponto 10 AL	1771	58 km	9 km	38 km
	Ponto 11 AL	1636	58 km	9 km	35 km
	Ponto 12 AL	1775	58 km	10 km	33 km

Fonte: Autor

Ao analisar os resultados, não foi possível observar alteração significativa das medições de velocidades nos trechos blindados e não blindados, ratificando a inconclusividade, com os dados atuais da relação direta da blindagem de acesso com aumento da velocidade. Alguns pontos devem ser considerados para análise futura:

- O número de trechos blindados ainda é baixo considerando todos os acessos do Complexo;
- Os trechos são dispersos ao longo dos acessos;
- Falta de informação deste indicador nos trechos antes da blindagem.

5.4 Efeitos colaterais observados

No último período de chuvas 2021/2022 os trechos blindados foram fundamentais para manutenção das operações nestes acessos, se mostrando eficientes nestas condições adversas.

Eliminação na carga e transporte de forro para esses trechos blindados, que historicamente demandavam de manutenções frequentes (turno a turno) nos períodos chuvosos, com retirada de material saturado para aplicação do forro. Redução nos aportes de sedimentos para os *sumps* a jusante dos trechos blindados, reduzindo assim necessidade de limpeza do material assoreado. O trecho estudado e os efeitos na massa movimentada podem ser observados através da Figura 36 e Figura 37.

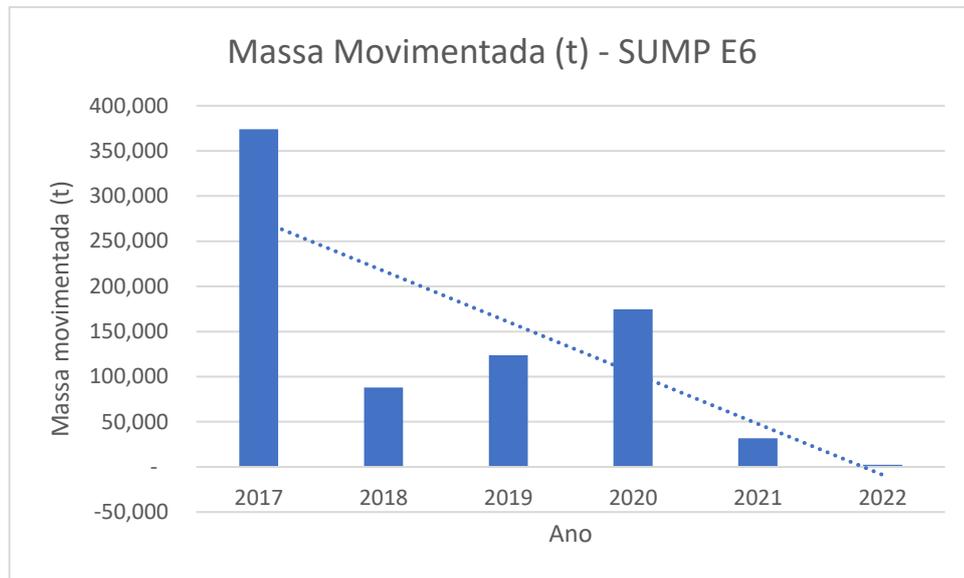
Figura 36: Exemplo Sump E6



Fonte: Autor via Google Earth

Todo aporte de material carreado pelas chuvas desta região vai para o Sump E6, com a blindagem feita em 2020 deste trecho em vermelho, reduziu fortemente o aporte de material para o *sump*, diminuindo assim a frequência da limpeza.

Figura 37: Massa movimentada - Sump E6



Fonte: Autor

Outros efeitos percebidos, mas não mensuráveis neste estudo é a melhoria nos desgastes de componentes de suspensão de equipamentos de transporte e consequente melhoria da disponibilidade e a melhoria nas condições ergonômicas dos operadores refletida em depoimentos de satisfação com a condição de trafegabilidade e segurança dos acessos. Temas que podem ser objetos de estudos no futuro.

6 CONCLUSÕES

O uso de material agregado para construção de acesso em vias de mina é uma tendência que cada vez avançará nos projetos de mineração desde sua concepção e viabilidade. Os ganhos ainda podem ser muito explorados e evidenciados através de estudos e pesquisas futuras neste tema. Através deste trabalho foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Ao analisar a mudança nas velocidades médias dos caminhões, não ficou perceptível um ganho ou notável alteração ao comparar os trechos antes e depois da aplicação da blindagem;
- Quando observado o período de chuvas e analisados com os meses de maior e menor velocidade média anual, foi notado que após a implementação da blindagem durante o ano de 2021 o mês com maior velocidade média apresenta-se durante o período chuvoso, característica que em outros anos podia ser observada com maior ocorrência em épocas com poucas chuvas;
- No último período de chuvas 2021/2022 os trechos blindados foram fundamentais para manutenção das operações nestes acessos;
- Graças a blindagem foi possível notar uma menor frequência da manutenção de *sumps*, como foi observado com o exemplo do Sump E6.

A não evidência do aumento da produtividade deste estudo não desencoraja novas pesquisas e levantamentos de mais dados para aumentar a assertividade das conclusões, muito menos diminui a importância desta atividade na rotina operacional. Ganhos paralelos como economia, segurança, e bem-estar dos operadores podem e devem ser mais evidenciados e já são percebidos no senso comum de todos que participam da rotina operacional e utilizam dos acessos blindados para executar sua atividade.

7 REFERÊNCIAS

BERNUCCI L.B., DA MOTTA L.M.G., CERATTI J.A.P., SOARES J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** 10.13140/2.1.4361.5684. (2007).

BERNUCCI L.B., DA MOTTA L.M.G., CERATTI J.A.P., SOARES J.B. **Pavimentação asfáltica Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro. PETROBRAS. 504 p. (2008)

BERNUCCI L.B., DA MOTTA L.M.G., CERATTI J.A.P., SOARES J.B. **Pavimentação asfáltica Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro. PETROBRAS. 504 p. 3 ed. (2010)

CATERPILLAR®. **Performance handbook.** Caterpillar Inc. Peoria, Illinois, U.S.A (2000)

CATERPILLAR®. **Performance handbook.** Caterpillar Inc. Edition 40. Peoria, Illinois, U.S.A:2010. 1442 p. (2011)

DAS, B.M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** Tradução da 9ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage, (2019).

DNIT, **Manual de Pavimentação.** IPR-719 3 ed. Rio de Janeiro, 274 p. (2006).

DRESCH, Fernanda. **Projeto de estradas.** 1. ed. Porto Alegre: SAGAH, 2018. ISBN 978-85-9502-304-8. (2018)

INMET site: <https://portal.inmet.gov.br/> (2022)

KOMATSU MINING SYSTEMS, INC. **Electric Drive Truck 730E.** Vernon Hills, IL, USA: (2001).

MASETTI, L. et al. **Manual de estradas de mina** – convênio Vale/UFOP. Ouro Preto: (2011).

NUNES L.B. **Construção Civil escola Nacional de Bombeiros** (2003).

OLIVEIRA FILHO, W. L. et al. **Manual de estradas de acesso de mina** – convênio Vale/UFOP. Ouro Preto: (2010).

PINHEIRO. A.M.G., MELO F.P. **Comparação entre a pavimentação flexível (Cbuq) e rígida (Concreto) no trecho do Trevo de Caeté/MG ao Trevo de Barão de Cocais/MG, na BR 381 Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas** (2020)

REIS, MAÍRA DOS SANTOS. **Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra a céu aberto de minério de ferro dentro do quadrilátero ferrífero**. 2014. Dissertação (Mestre em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], (2014).

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero: uma visão geral e discussão**. Geonomos, Belo Horizonte, n. 8^a, p. 27-43, (2000).

SANTOS C. M. **Pavimentação de estradas de mina** [manuscrito]: um estudo de caso do Complexo Mariana, VALE S/A. / 92 f. (2021)

SOUSA, LILIAN MASETTI LOBO SOARES DE. **Estudos de dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto**. Dissertação (Mestre em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], (2011).

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. **Mine Haul Road Design**, Construction and Maintenance Management (Material de curso). Belo Horizonte, (2008).

THOMPSON A.T., VISSER R.J. **Mine haul road maintenance management systems**. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy (2003)