



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto- UFOP
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM

**ENGENHARIA
MINERAL**



ALMA MATER IN
MINERALIA BRASILIENSIS

VALDICLEI NUNES DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DE UM PROJETO INTEGRADO DE ESTRADA DE
MINA**

Ouro Preto

2022

AVALIAÇÃO DE UM PROJETO INTEGRADO DE ESTRADA DE MINA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Lavra de Mina

Autor: Valdiclei Nunes dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de lima

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237a Santos, Valdiclei Nunes dos.
Avaliação de um projeto integrado de estrada de mina. [manuscrito] /
Valdiclei Nunes dos Santos. - 2022.
81 f.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro
Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mineral.
Área de Concentração: Lavra de Minas.

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

CDU 622.27:625.8

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA
MINERAL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Valdiclei Nunes dos Santos

Avaliação de um projeto integrado de estrada de mina

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre

Aprovada em 15 de agosto de 2022

Membros da banca

Dr. Hernani Mota de Lima - Orientador - UFOP
Dr. Wilson Trigueiro de Souza - Fundação Gorceix
Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz - UFOP

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 08/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL**, em 15/12/2022, às 14:59, 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, informando o código verificador **0444806** e o código CRC **74C0FBC5**.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha esposa Kelly Bernardino Resende Melo dos Santos e aos meus pais José Neres dos Santos e Guilhermina Nunes dos Santos que sempre me apoiaram e me incentivaram durante esta etapa da minha vida.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por sempre me mostrar o caminho certo.

Sou grato aos meus pais José Neres dos Santos e Guilhermina Nunes dos Santos pelo incentivo aos estudos e pelo apoio incondicional.

Agradeço à minha esposa Kelly Bernardino Resende Melo dos Santos por estar ao meu lado em todos os momentos.

Grato pela confiança depositada do meu orientador Prof. Dr. Hernani Mota de Lima que dedicou inúmeras horas para sanar as minhas questões e me colocar na direção correta.

Resumo

Este trabalho apresenta a importância das estradas de mina a céu aberto, determinando os impactos e benefícios causados pela alteração na forma de executar o dimensionamento de camadas do pavimento aplicado a estradas de mina, utilizando o método Índice de Suporte Califórnia (CBR). O planejamento, construção e manutenção de estrada de mina devem ser tratados como prioridade já que incide diretamente no custo de transporte e manutenção de equipamentos. Foram analisados projeto geométrico, projeto estrutural e projeto de drenagem, após diagnóstico foi possível aplicar as técnicas e conceitos básicos de engenharia de pavimento no desenvolvimento de um projeto integrado. Através das propriedades geotécnicas dos materiais foi possível caracterizar e selecionar um material de melhor desempenho para a construção das camadas. Pensado nisso, o presente estudo buscou calcular o custo para adequação de uma estrada e estabelecer um padrão para dimensionamento das camadas estruturais.

Palavras-chave: Lavra de Minas a céu aberto, Projeto Integrado, Gestão de estradas de mina.

Abstract

This work presents the importance of open pit roads, determining the impacts and benefits caused by the open surface (in the form of execution of the paving coating dimension applied to the mine California, using the Open pit mine support index method). open). The planning, construction and maintenance of the mine road should be treated as a priority as it does not incur the cost of transport and maintenance of equipment. It was designed from structural engineering design, structural and construction design, after possible to apply as integrated design engineering techniques and concepts. Through the geotechnical properties of the materials, it was possible to characterize and select a better performance material for the construction of the layers. In this way, the bus calculated for the presented standard cost of a road and establish a dimensioning of the structural layers. The main results obtained were: Reduction in tire wear, safety and according to the reduction, cost reduction, reduction of carbon emission in the atmosphere and reduction of fuel consumption.

Keywords: Open pit mining, Integrated Project, Mine Road management.

Sumário

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 – REVISÃO DA LITERATURA.....	2
2.1 DEFINIÇÕES BÁSICAS	2
2.2 PROJETO GEOMÉTRICO	4
2.3 PROJETO ESTRUTURAL	16
2.4 PROJETO FUNCIONAL	18
2.4.1 Resistência ao Rolamento	19
2.5 PROJETO DE DRENAGEM	20
2.6 CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS	21
2.7 MANUTENÇÃO EM ESTRADAS	21
2.7.1 Métodos empíricos.....	24
2.7.2 Métodos mecanístico – empíricos.....	24
2.8 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DE CAMADAS DE BASE E SUB-BASE	25
2.9 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DE CAMADAS REVESTIMENTO.....	26
2.10 VIDA ÚTIL DE ESTRADAS DE MINA	27
2.11 MÉTODO <i>CALIFORNIA BEARING RATIO</i> (CBR).....	29
2.12 CUSTOS DE LAVRA	31
Capítulo 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO	36
3.2 SELEÇÃO DO MATERIAL PARA CONSTRUÇÃO.....	37
3.3 MONITORAMENTO DAS ESTRADAS	37
Capítulo 4 - ESTUDO DE CASO.....	39
4.1 LOCALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	39
4.2 RESULTADO	40
4.2.1 Especificações das estradas	40
4.2.2 Monitoramento das estradas	41
4.2.4 Boa prática quanto à gestão	44
4.2.4.1 Projeto geométrico	44
4.2.4.2 Projeto de Pavimento (Situação atual)	48
4.2.4.3 Boa Prática recomenda.....	48
4.2.4.4 Projeto drenagem (Prática atual)	51

4.2.4.5 Boa Prática recomendada	52
4.2.4.6 Gerenciamento da manutenção (Prática atual).....	54
4.2.4.7 Inspeção de Pista	55
4.2.4.7 Ações implementadas.....	56
4.2.4.8 Controle de poeira	57
4.2.4.8 Classificação das estradas	58
4.2.4.9 Resultado.....	59
Capítulo 5 - CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

Lista de Abreviações, Nomenclaturas e Símbolos

g	Aceleração da gravidade
α	Ângulo entre a superfície da estrada e o plano horizontal
NRM	Norma Reguladora da Mineração
DMT	Distância média de transporte
t	Tempo de parada
θ	Grade de rampa
v_0	Velocidade do veículo
U	Coefficiente de atrito entre os pneus e a superfície da estrada
H	Desnível ou distância vertical
C	Comprimento da via ou distância horizontal
S	Distância em superfície inclinada da via
L	Largura da estrada
V	Números de Vias
X	Largura do Veículo
NR	Norma Regulamentadora
V_0	Velocidade de projeto do veículo
R	Raio de Curvatura
f	Coefficiente de atrito
m	Metro
v^2	Velocidade de projeto do veículo
e	Superelevação
S	Superlargura
n	Números de pista
E	Distância entre eixos mais afastados
v	Velocidade de projeto
GC	Coefficiente de graduação
SP	Produto de contração
%	Porcentagem
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
km	Quilômetro

ISC

Índice de soporte California

Listas de figuras

Figura 1 – Fluxograma de projetos de estradas de mina	3
Figura 2 - Esquema ilustrando distância de parada de um veículo	5
Figura 3 - Gradiente de rampa.....	6
Figura 4 - Inclinação longitudinal	8
Figura 5 - Distância de parada.....	8
Figura 6 - Altura de leira de segurança na mina.....	9
Figura 7 - Representação de superelevação.....	11
Figura 8 - Esquema de superlargura	13
Figura 9 - Exemplo de transição.....	14
Figura 10 - Inclinação de drenagem nas pistas.....	15
Figura 11 – Exemplo de Switchbacks	16
Figura 12 - Projeto de pavimento de mina	17
Figura 13 - Seção típica de um forro de uma estrada de mina	19
Figura 14 - Bacia dissipadora de energia	20
Figura 15 - Ábaco para a definição do momento a se intervir na estrada	23
Figura 16 - Coeficiente de graduação para materiais de revestimento.....	27
Figura 17 - Classificação de estrada de mina	28
Figura 18 - Ábaco para dimensionamento de pavimento usando o CBR e carga de roda	30
Figura 19 - Distribuição dos custos da lavra convencional por caminhões	31
Figura 20 - Divisão dos custos de operação em uma mina de ferro de grande porte....	32
Figura 21 - Representação gráfica do procedimento para dimensionamento.....	35
Figura 22 – Monitoramento das estradas utilizando Drone.....	38
Figura 23 - Largura das pistas	40
Figura 24 - Problemas com interseções entre elementos geométricos.....	42
Figura 25 – Identificação das curvas mais severas.....	43
Figura 26 - Leira de segurança (Lateral e Central).....	43
Figura 27 - Projeto e adequação do trevo	45
Figura 28 - Mapa de aceleração lateral.....	46
Figura 29 - Leira lateral dentro dos padrões de segurança.....	47

Figura 30 - Redução de DMT.....	47
Figura 31 – Filtro de materiais compactos	49
Figura 32 – Itabirito Compacto	50
Figura 33 – Itabirito Pobre Brando.....	50
Figura 34 – Ausência de drenagem na praça de carregamento	52
Figura 35 - Direcionamento de águas pluviais nas estradas.....	53
Figura 36 - Sump para drenagem da água	53
Figura 37 - Drenagem de bancos.....	54
Figura 38 - Defeitos encontrados nas estradas	56
Figura 39 - Adequação das estradas	57
Figura 40 - Umidificação de estradas e taludes.....	58
Figura 41 – Redução de DMT após monitoramento	59
Figura 42 - Monitoramento de aceleração lateral.....	60
Figura 43 - Dimensionamento da camada do pavimento plano vertical	62
Figura 44 - Dimensionamento da camada do pavimento plano horizontal	63

Listas de Tabelas

Tabela 1 – Largura mínima da pista	10
Tabela 2 - Velocidade do veículo em relação ao raio de curvatura.....	12
Tabela 3 - Valores de coeficiente de atrito	13
Tabela 4 - Principais defeitos encontrados em estradas de mina.....	22
Tabela 5 - Requisitos para camadas estruturais.....	25
Tabela 6 - Propriedades geotécnicas de possíveis materiais de construção	25
Tabela 7 - Propriedades de materiais recomendadas para revestimento	26
Tabela 8 - Propriedades geotécnicas de materiais	37
Tabela 9 - Especificações técnicas CAT 793	39
Tabela 10 - Raio de curvatura x Velocidade	45
Tabela 11 - Dimensionamento do pavimento CAT 793.....	62

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As estradas são fundamentais para uma operação de mina, pois possibilitam a movimentação de bens, permitindo o transporte de minério e estéril das frentes de lavra para as instalações de britagem e pilhas de estéréis, respectivamente. O planejamento de uma estrada de mina está associado à aderência ao plano de lavra e afeta o custo e manutenção de equipamentos de transporte. Esta dissertação de Mestrado tem por objetivo avaliar as condições das vias e acessos de uma mina a céu aberto, bem como uma análise do projeto de estrada de mina, caracterizar e selecionar materiais para a construção das camadas do pavimento, analisar as condições gerais da estrada em uma mina a céu aberto, mitigar os custos operacionais, dimensionar as camadas de base, sub-base e revestimento de estrada em uma mina a céu aberto, realizar um diagnóstico para intervenções de manutenção da pista, abordar os aspectos geométricos, estruturais, e funcionais de estradas de mina para operação de equipamentos de grande porte. A metodologia utilizada aborda a revisão das práticas atuais, propor uma aplicação correta e sistêmica das fases, e estabelecer um padrão para dimensionamento das camadas estruturais e funcionais, mensurar os benefícios da confecção e manutenção das estradas. Desta forma, a análise de um projeto integrado de estradas de mina com foco na mitigação dos custos operacionais, associado à redução do consumo de diesel e a consequente emissão de carbono, justifica e salienta importância do estudo.

Capítulo 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 DEFINIÇÕES BÁSICAS

As estradas são responsáveis pelo desenvolvimento e sequenciamento das frentes de lavra, sendo o principal componente para possibilitar as operações em uma mina, pois todo fluxo de veículos e equipamentos para movimentação de massa na mina transitam por elas. Em função disso, a falha na construção e gerenciamento das estradas de mina, podem ocasionar problemas que abrangem aos aspectos geométricos, estruturais, e funcionais, e tem ligação direta no aumento dos custos operacionais e de eventos de segurança na mina (THOMPSON; VISSER, 2006).

Na construção das estradas de minas os critérios específicos dos projetos de caráter geométrico, estrutural, funcional e de drenagem devem ser seguidos. A gestão eficiente desses projetos proporciona o aumento na saúde e segurança ocupacional, e controle dos custos operacionais de transporte relacionados a manutenção dos veículos e equipamentos que trafegam pela via (SOUSA, 2011).

As estradas de mina é uma via não pavimentada e provocam um desafio muito grande para as áreas de operação, infraestrutura e planejamento de lavra, pois todo o escoamento da produção é realizado por elas. Com isso, projetos mal executados podem comprometer a segurança da operação, acarretar aumentos no custo de manutenção de equipamentos com a redução da vida útil de componentes, e consumo excessivo de combustível e pneus, e impactos socioambientais (SILVA, 2020).

As estradas de mina foram consideradas por muito tempo pouco relevantes dentro da atividade mineração. Porém, hoje, as estradas vêm ganhando cada vez mais destaque no setor mineral, com estudos para avaliar a influência das estradas no custo operacional, na saúde e segurança dos colaboradores, e impacto na produtividade dos equipamentos, que afetam diretamente o lucro da empresa (REIS, 2014).

A Figura 1 ilustra as etapas de construção e gestão de estradas de mina.

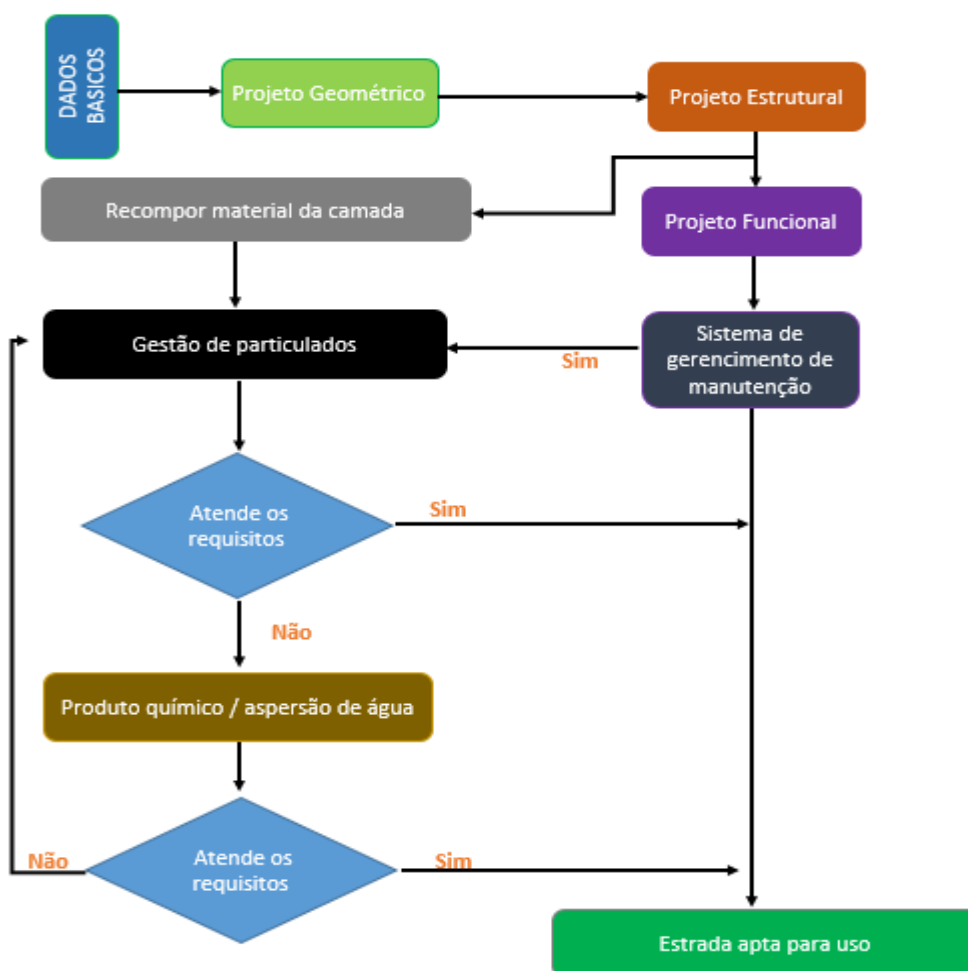


Figura 1 – Fluxograma de projetos de estradas de mina

Fonte: Thompson e Visser (2006).

Para um projeto integrado o foco principal refere-se ao *layout* e alinhamento das estradas de mina. Tendo dois planos, o vertical, e o horizontal, no alinhamento do plano vertical, planeja-se as estradas para serem seguras e eficientes, a distância de visão e de parada do condutor, e gradiente de rampa são os aspectos observados neste plano. Já no plano horizontal projeta-se para as estradas serem seguras, voltadas a largura das estradas, raio de curvaturas, *Swichbacks*, superelevação, cruzamentos, Berma de segurança (Leira)

e inclinação transversal para direcionamento de água e superlargura de curvas, esses planos são definidos na fase de projeto geométrico. O projeto estrutural, é idealizado após definição dos princípios do projeto geométrico. Define-se a espessura da camada de base e sub-base, essa camada fica sobre o material *in-situ*. O projeto funcional é representado pela camada de revestimento da estrada, e tem por objetivo diminuir o impacto sofrido pelos pneus dos equipamentos, formando uma camada mais aderente para facilitar o fluxo dos equipamentos. Sistema de gerenciamento de manutenção refere-se estimar com que frequência as estradas se deteriora e planejar as manutenções e sanar essa deterioração. (THOMPSON; VISSER, 2006).

2.2 PROJETO GEOMÉTRICO

Como apresentado na Norma Reguladora da Mineração (NRM) N° 13, sinalização, largura mínima das vias e leiras de tamanho padrão são requisitos necessários para proporcionar segurança no tráfego de veículos e equipamentos. A largura mínima aceitável das estradas de mina de pista simples deverá ser o dobro da largura do maior equipamento em operação, e para pista dupla essa largura deverá ser dimensionada em no mínimo três vezes e meia da largura do maior equipamento em operação. As estradas devem ser sinalizadas com placas e tubos refletivos para orientação dos operadores e condutores em ambos os períodos (diurno e noturno). Leiras de segurança devem ser construídas com altura mínima igual ou superior à metade do pneu do maior equipamento ou veículo que transita pela via, sendo que elas devem estar sempre sinalizadas e em boas condições de uso (BRASIL, 2019).

Sousa (2011) ressalta que, além dos elementos físicos e peculiaridades operacionais de cada mina, os parâmetros geométricos atendidos colaboram para um melhor desempenho do caminhão, podendo levar em considerações uma melhor frenagem, uma melhor aceleração, melhores condições de segurança e aumento de produtividade. Os principais parâmetros a serem dimensionados no projeto geométrico

incluem distância de parada, a inclinação longitudinal de rampas, a distância de seguimento, as leiras (bermas) de segurança, a largura de via, a superelevação de curvas, o raio de curvatura, a intersecção entre elementos geométricos, e inclinação transversal para direcionamento de drenagem.

A distância de parada é aquela que permite ao condutor ter condições de parar o veículo com total segurança, desde o momento da visualização do obstáculo, conforme Figura 2. Para seu cálculo são levados em consideração o tempo de reação do condutor, frenagem do veículo, distância de percepção e tempo de reação (FAMBRO; FITZPATRIC; KOPPA, 1997).

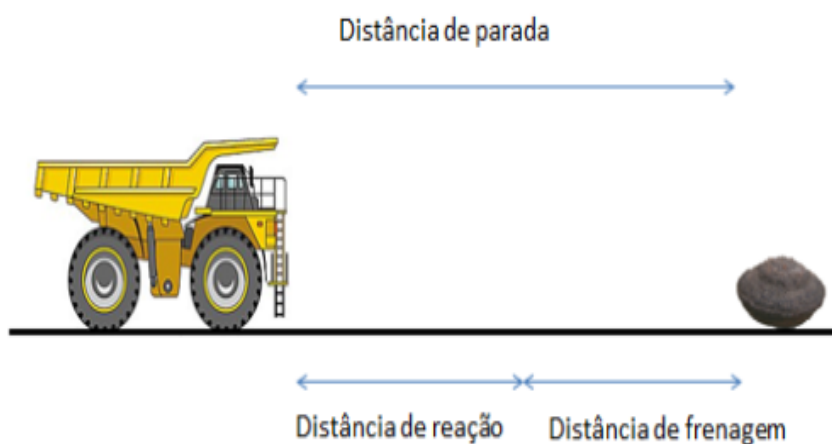


Figura 2- Esquema ilustrando distância de parada de um veículo (Padronizar)

Fonte: Pellissari (2019).

Segundo Thompson e Visser (2014), a distância de parada pode ser expressa pela Equação (1):

$$sd = \frac{1}{2}gt^2 + v_0 * t + \left(\frac{(g*t*\sin \theta + v_0)^2}{2*g*(U_{min} - \sin \theta)} \right) \quad (1)$$

Em que:

g = aceleração da gravidade (m/s);

t = tempo de parada (s);

θ = grade de rampa (graus);

v_0 = velocidade do veículo (m/s);

U_{min} = coeficiente de atrito entre pneus / superfície da estrada.

A inclinação verticalizada em relação à horizontal é denominada gradiente de uma rampa, sempre expressada em percentual, de acordo com a Figura 3. O gradiente de máximo de uma estrada é limitado em 10 % (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

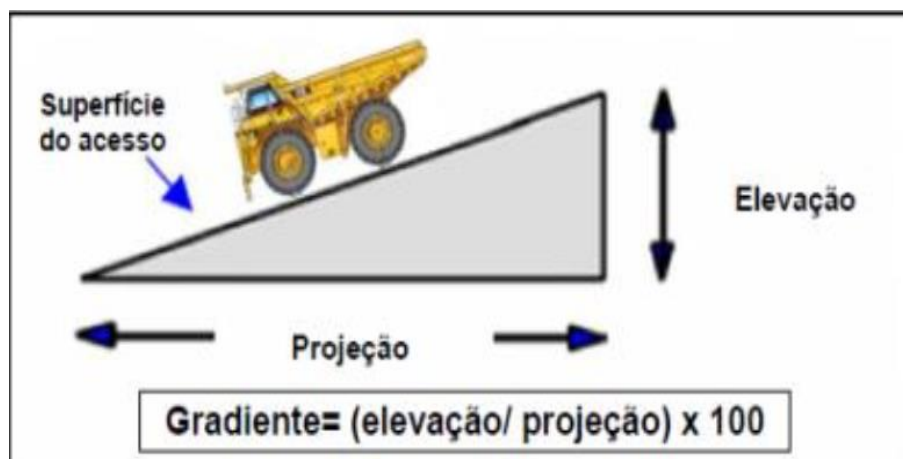


Figura 3 - Gradiente de rampa

Fonte: Kaufman e Ault (1977).

A equação 2 representa o cálculo do gradiente (G%) de uma estrada:

$$G(\%) = \left(\frac{H}{C}\right) * 100 \quad (2)$$

Em que:

H= desnível ou distância vertical (m);

C= comprimento da via ou distância horizontal (m).

A Equação 3 representa o cálculo de inclinação da via e o ângulo:

$$G(\%) = 100 * \tan \alpha \quad (3)$$

Em que:

α = ângulo, em graus, formado pela estrada e o plano.

A inclinação longitudinal da estrada juntamente com as peculiaridades da operação contribui para o aumento dos custos unitários de transporte. Portanto, respeitar as condições operacionais mínimas estipuladas no manual do fabricante relacionados a inclinação de rampa e conservação das vias proporciona uma redução no consumo de combustível, e um menor desgaste de pneus e de componentes do equipamento de transporte. Para uma melhor trafegabilidade dos equipamentos, redução de custos e segurança operacional, as inclinações das rampas devem seguir os requisitos mínimos aceitáveis (SOUZA JÚNIOR, 2012).

Thompson e Visser (2014) relatam que, as inclinações longitudinais das estradas não devem ter mudanças repentinas, devendo ser sempre constantes, pois um gradiente constante evita mudanças abruptas de marcha que interferem na velocidade do caminhão. Uma inclinação longitudinal inconstante de uma rampa acarreta aumento de custo na manutenção dos equipamentos, perda de produtividade e redução no tempo de vida útil dos pneus, devido a cortes causados por materiais que transbordam da caçamba dos caminhões, além do aumento na intervenção de manutenção na estrada, conforme Figura 4.

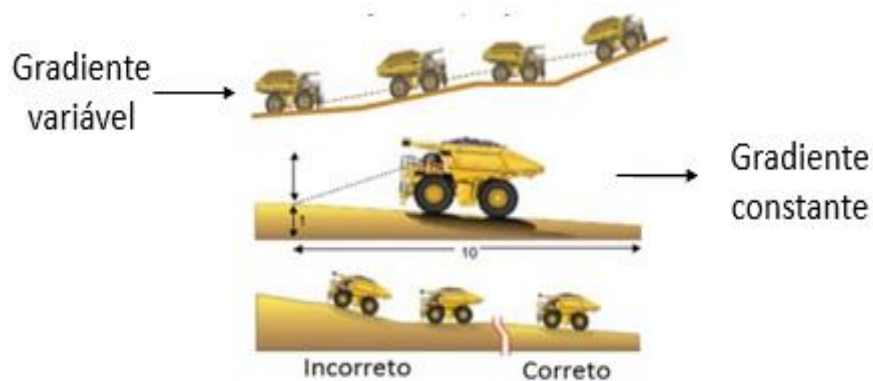


Figura 4- Inclinação longitudinal

Fonte: Adaptado de Caterpillar (2009).

Coutinho (2017) define a distância de seguimento como a distância mínima de segurança que um equipamento deve manter do outro. A distância (D_p) é composta pela soma da (D_1) distância de percepção e reação e (D_2) distância de frenagem, conforme Figura 5.

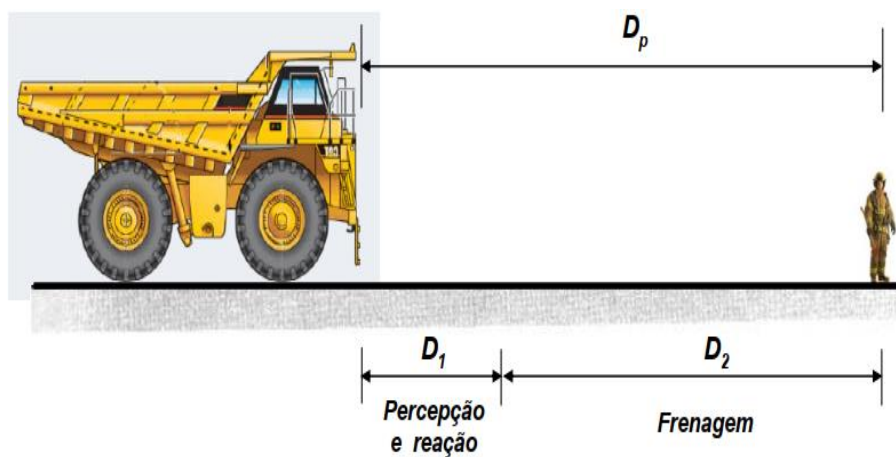


Figura 5 - Distância de parada

Fonte: Coutinho (2017).

A Norma Regulamentadora NR-22, recomenda a construção de leiras de proteção nas estradas com altura mínima da metade do diâmetro do maior pneu de equipamento

que opera na mina, conforme Figura 6. As leiras devem suportar o impacto do equipamento evitando a queda dele, então, leiras frágeis não conseguem cumprir o seu papel, e leiras altas prejudicam a visibilidade do operador, sendo a altura das leiras importantes para a segurança e saúde ocupacional (BRASIL, 2019). Recomenda-se para a construção de leiras de segurança com materiais friáveis, de modo a evitar cortes nos pneus em contato com blocos na lateral da via.



Figura 6 - Altura de leira de segurança na mina

Fonte: Coutinho (2017).

Ainda, segundo a Norma Regulamentadora NR-22, para se ter um trânsito seguro em minas a céu aberto as estradas devem ser duas vezes mais largas que a largura do maior equipamento ou veículo quando transitando em pista simples e três vezes e meia maior que a largura do maior equipamento ou veículo transitando em pista dupla, conforme ilustra a Tabela 1, a fim de não influenciar na velocidade média dos equipamentos de transporte e conseqüentemente impactar a produtividade dos equipamentos (BRASIL, 2019). Quando essas exigências não podem ser atendidas deve existir sinalização no trecho orientando e auxiliando os condutores que transitam no local.

Capacidade (ton)	Largura do caminhão (m)	Largura da estrada (m)
170	7.10	25
240	7.60	30
320	8.45	32
360	9.15	36.8

Tabela 1 – Largura mínima da pista

Fonte: Caterpillar (2009).

De acordo com Tannant e Regensburg (2001), essa largura pode ser calculada pela equação 4.

$$L = (1,5 * V + 0,5)X \quad (4)$$

Em que:

L = largura da estrada (m);

V = números de Vias;

X = largura do Veículo (m).

Segundo Departamento Nacional de Infraestrutura (DNIT, 2006), a definição de superelevação é a inclinação transversal da pista nas curvas horizontais, o objetivo dessa curva é aumentar a segurança e conforto do condutor através da força centrípeta na compensação da força centrífuga.

Para Dner (1999), a superelevação de curvas pode ser calculada pela equação 5.

$$e = \frac{Vo^2}{127 * R} - f \quad (5)$$

Em que:

Vo = velocidade de projeto do veículo (km/h);

R = raio de Curvatura (m);

f = coeficiente de atrito (adimensional).

A Figura 7 ilustra o exemplo de uma superelevação, de onde pode-se observar que no início há um trecho normal e próxima à seção circular da pista, tem-se uma inclinação de 2%.



Figura 7 - Representação de superelevação

Fonte: Vieira (2013).

De acordo com Thompson e Visser (2014), para uma melhor performance dos caminhões, ou seja, quanto maior o raio de curvatura, maior será a velocidade que o caminhão irá executá-la e menor será a superelevação, conforme Tabela 2.

Raio de curva (m)	Velocidade 16 km/h	Velocidade 24 km/h	Velocidade 32 km/h	Velocidade 40 km/h	Velocidade 48 km/h	Velocidade 56 km/h	Velocidade 64 km/h
15,2	13%	30%	-	-	-	-	-
30,5	7%	15%	27%	-	-	-	-
45,7	4%	10%	18%	28%	-	-	-
61,0	3%	8%	13%	21%	30%	-	-
91,5	2%	5%	9%	14%	20%	27%	-
152,4	1%	3%	5%	8%	12%	16%	21%
213,4	1%	2%	4%	6%	9%	12%	15%
304,9	1%	2%	3%	4%	6%	8%	11%

Tabela 2 - Velocidade do veículo em relação ao raio de curvatura

Fonte: Caterpillar (2009)

Pellissari (2019), relata que um raio de curva mal planejado, e/ou mal construído, contribui para o aumento do esforço excessivo nos caminhões, e podem danificar a camada funcional das estradas devido ao arraste lateral, afetando diretamente na queda de produtividade do veículo. A Equação 6 mostra como o raio de curvatura pode ser calculado, priorizando um raio mais suave possível (DNER, 1999).

Os valores de coeficiente de atrito apresentados na Tabela 3 são utilizados para este cálculo.

$$R = \frac{v^2}{127(e + f)} \quad (6)$$

Em que:

v^2 = velocidade de projeto do veículo (km/h);

e = superelevação;

f = coeficiente de atrito entre os pneus na estrada.

Natureza da Pista	Coefficiente de atrito de pneus / pista (t/t)
Pavimento concreto	0.90
Terra firme seca	0.55
Terra solta	0.45
Areia úmida	0.40
Areia seca e terra solta úmida	0.20

Tabela 3 - Valores de coeficiente de atrito

Fonte: Adaptado de Sousa (2011).

A superlargura em curvas assegura que os veículos trafeguem em condições segura, evitando colisões, redução de velocidade e pouca visibilidade do condutor (DNER, 1999). A Figura 8 mostra uma superlargura bem projetada e dimensionada para melhores condições de segurança e tráfego.

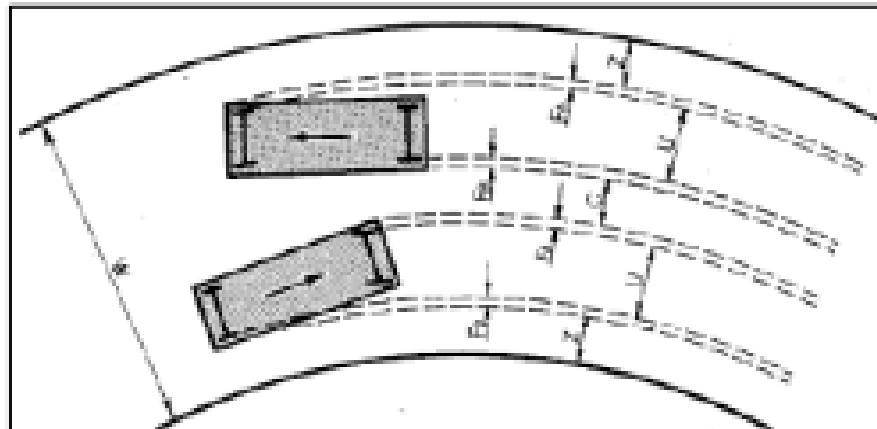


Figura 8 - Esquema de superlargura

Fonte: Kaufman e Ault (1977).

Segundo DNER (1999), pela equação 7 é possível calcular a superlargura.

$$S = n \cdot (R - \sqrt{R^2 - E^2}) + \frac{v}{10\sqrt{R}} \quad (7)$$

Em que:

S = superlargura (m)

n = números de pistas;

R = raio de curva(m);

E = distância entre eixos mais afastados;

v = velocidade de projeto (km/h).

As interseções entre elementos geométricos devem ser planejadas e projetadas com a finalidade de estabelecer melhores condições de segurança e operação em trevos, cruzamentos, rotatórias e dentre outras interseções entre diferentes vias, conforme evidencia a Figura 9.

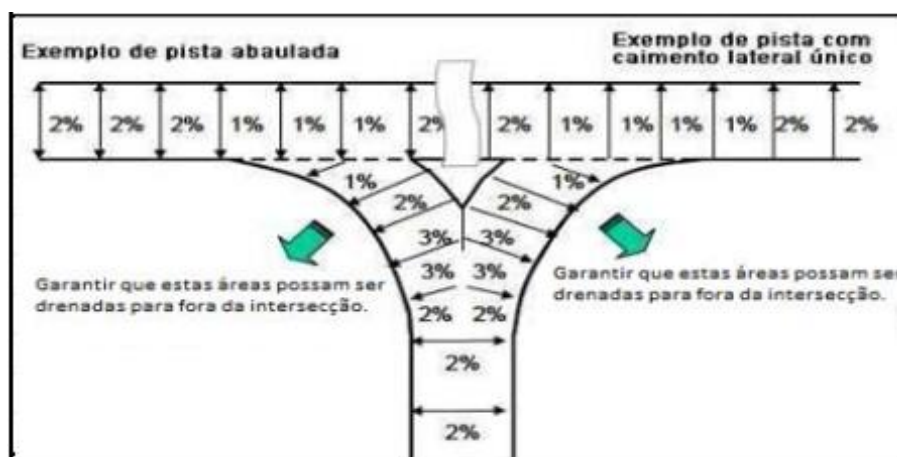


Figura 9 - Exemplo de transição

Fonte: Thompson e Visser (2014).

Um desafio para empresas de mineração é manter as estradas em condições operacionais no período de chuva, com um leve caimento na mediana da pista formando assim o abaulamento para facilitar o escoamento para as laterais da pista e caimento lateral único, ambos apresentados na Figura 11. Reis (2014) salienta que o caimento lateral único é favorável em relação ao abaulamento de pista, pois requer somente uma

construção da sarjeta no lado do fluxo, já no caso do abaulamento serão duas sarjetas construídas em ambos os lados.

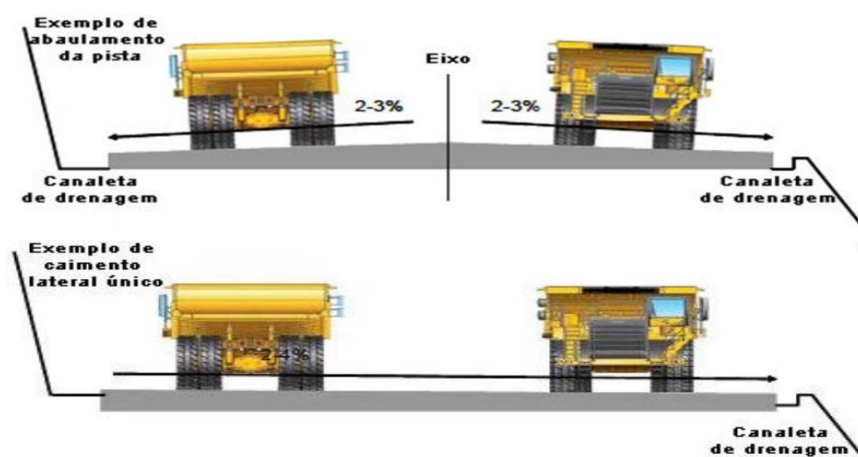


Figura 10 - Inclinação de drenagem nas pistas

Fonte: Reis (2014).

Para Thompson e Visser (2014), os *Switchbacks* devem ser projetados com o raio de curvatura máximo possível, e sempre deverá ser mantido suaves e constantes, as curvas acentuadas irá impactar no custo de transporte, principalmente relacionado ao desgaste prematuro de pneus devido ao arraste lateral, conforme ilustra Figura 11.

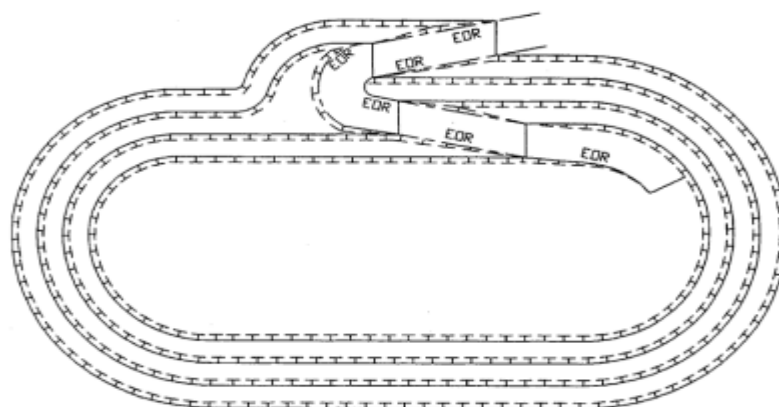


Figura 11 – Exemplo de Switchbacks

Fonte: Própria

2.3 PROJETO ESTRUTURAL

O objetivo do projeto estrutural é permitir que as estradas possam suportar as cargas que são impostas ao longo de sua utilização, evitando manutenções excessivas e danos às camadas do pavimento. Uma estrada de mina é submetida a grande carga levando a grandes esforços, então, o dimensionamento das camadas do pavimento é idealizado na fase do projeto estrutural, com o principal objetivo suportar grandes cargas sofridas pelas camadas. O dimensionamento das camadas poderá proporcionar uma melhor produtividade dos caminhões, diminuir os riscos estruturais das estradas, mitigar os custos de transporte e reduzir as intervenções de manutenção (THOMPSON; VISSER, 2014).

A deformação e rompimento das camadas estruturais são minimizadas ou eliminadas por meio de um bom dimensionamento das camadas de sustentação que compõem uma estrada de mina. Thompson e Visser (1996) enfatizam que a competência do material *in situ*, o volume de tráfego e a vida das estradas devem ser levados em consideração.

De acordo com Soares *et al.* (2012), o pavimento é constituído por três camadas. A camada da superfície denominada revestimento, e tem um caráter funcional, cuja finalidade é melhorar a trafegabilidade e aderência dos equipamentos. As camadas estruturais (base e sub-base) são projetadas e construídas sobre material *in situ* ou em alguns casos em que exige o nivelamento da superfície, denominado subleito.

Para construção de uma estrada é necessário, além das camadas do pavimento, a adequação e conformação do subleito, a instalação de canaletas de drenagem e leiras de segurança de forma a garantir a operacionalidade segura e econômica da via (SOUSA, 2011). Conforme Figura 12.

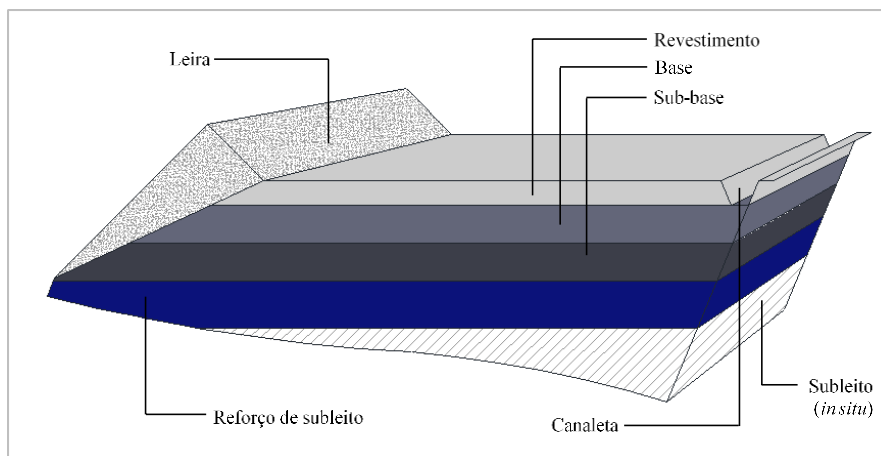


Figura 12 - Projeto de pavimento de mina

Fonte: Sousa (2011).

O revestimento é a camada que compõe a superfície da via, tem o objetivo de aumentar a tração, resistência e aderência dos pneus do veículo, e minimizar a percolação de água nas camadas do pavimento. O revestimento de uma estrada deve proporcionar benefícios para preservação das camadas, além de absorver o tráfego em condições climáticas diferentes; reduzir a emissão de poeira no período sem chuvas; melhorar aderência de piso da pista no período chuvoso; e minimizar a necessidade de manutenção.

A base deve ter alta resistência e uma boa estabilidade. Ela tem a função de receber e distribuir as tensões dos pneus dos veículos e equipamentos, para que essas forças exercidas sobre as camadas não danifiquem a camada de sub-base ou subleito.

A sub-base é projetada e construída geralmente sobre subleitos de solos pouco competentes. Em geral é construída com material granular.

2.4 PROJETO FUNCIONAL

O projeto funcional é o processo de selecionar material ou misturas de materiais de revestimento mais apropriados. Deve cumprir as necessidades operacionais,

controlando a emissão de particulados, proporcionando segurança operacional, redução de custos operacionais, tração e resistência ao rolamento (THOMPSON; VISSER, 1996).

Segundo Sousa (2011), o objetivo principal do projeto funcional é a seleção adequada de materiais para compor a camada denominada revestimento, aumentando o conforto e segurança dos equipamentos e veículos que transitam pela a estrada, propiciando redução de custos.

A aplicação de técnicas apropriadas, reduz a frequência do surgimento de deformações, minimizando a manutenção, e conseqüentemente, reduzindo os custos operacionais e garantindo a segurança, e conforto operacional e minimizando impactos ao meio ambiente (TANNANT; REGENSBURG, 2001). Conforme mostra a Figura 13.

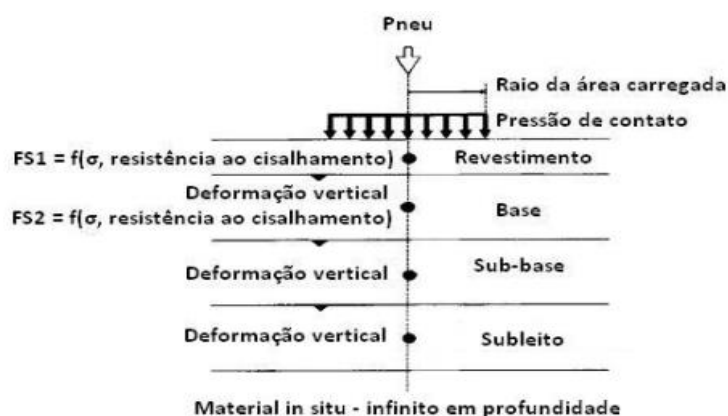


Figura 13 - Seção típica de um forro de uma estrada de mina

Fonte: Thompson e Visser (1996).

2.4.1 Resistência ao Rolamento

Segundo Silva (2020), resistência ao rolamento é importante para medir a qualidade de uma estrada e estratégias de manutenção de mina. Já que as condições das estradas têm influência significativa na produtividade dos equipamentos, e relação no gerenciamento de custos operacionais da empresa. Resistência ao rolamento aumenta o custo de manutenção do caminhão, afeta a produtividade da frota, aumenta o consumo de

combustível e pneu, aumentando assim o custo operacional (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

Para Caterpillar (2016), a resistência ao rolamento pode ser calculada conforme a equação 8:

$$RR = [2\% + (0.6 \times a)] \times GVM \quad (8)$$

Em que:

RR = Resistência ao Rolamento;

a = Penetração do pneu (cm);

GVM = Massa (ton).

2.5 PROJETO DE DRENAGEM

O projeto de drenagem de uma estrada trata do direcionamento das águas de chuva que incidem nos e/ou escoam as estradas. As estradas é um potencial ponto de interceptação de águas da mina, com possibilidades de haver acúmulos no decorrer da estrada (THOMPSON; VISSER, 1996). Na Figura 14, ilustra uma bacia para dissipar a energia das águas pluviais, que tem por finalidade receber as águas escoadas da pista, reduzir a velocidade do escoamento para evitar processos erosivos e possibilitar a deposição de partículas sólidas arrastadas pelas águas (REIS, 2014).



Figura 14 - Bacia dissipadora de energia

Fonte: Reis (2014).

Para dimensionamento dos elementos de drenagem corretamente, é necessário que os índices pluviométricos e todos os pontos de divisão de fluxo de água e coletores da cava sejam levados em consideração. Desta forma, para evitar acidentes, perda de produtividade e aumento de custo operacional torna-se importante e necessário a idealização de um projeto de drenagem para o correto dimensionamento dos elementos de drenagem (THOMPSON; VISSER, 2014).

Para Vieira (2013), drenagem superficial de mina é fundamental para mitigar as deformações das camadas de revestimento, de base e sub-base das estradas causadas pela ação da água. Desta forma, quanto mais eficiente for a drenagem, menos intervenção de manutenção e readequação das camadas do pavimento serão necessárias.

2.6 CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS

A seleção do material para a construção de estradas, é uma etapa muito importante, pois é baseada nas propriedades do material, tais como granulometria do material, resistência à compressão, adaptação a intempéries e rigidez. Para controlar o tamanho das partículas especificamente esse material pode ser britado, a camada de

superfície exige o melhor material disponível, pois enfrenta as maiores cargas de energia devido ao deslocamento do caminhão (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

Para construção da camada de superfície da estrada, os tipos de materiais podem ser usados:

- Cascalho compactado;
- Pedra Britada;
- Concreto asfáltico;
- Concreto compactado a rolo;
- Terra seca (estabilizada).

2.7 MANUTENÇÃO EM ESTRADAS

Para Hugo *et al.* (2005), os métodos para realizar as manutenções nas estradas de transporte de mina é feita em intervalos programados ou após inspeções. Esses métodos podem elevar os custos operacionais, seja pela manutenção excessiva da estrada ou pela falha no reconhecimento da deformação significativa.

Segundo Tannant e Regensburg (2001), a falta de manutenção nas estradas de mina podem aumentar os custos operacionais. As principais falhas nos pneus são causadas por cortes e impactos, essas falhas podem ser gerenciadas com construção e principalmente com manutenção de estradas adequadas.

Para obter sucesso nas operações de manutenção é necessário que se conheça o defeito que deverá ser eliminado e sua causa raiz. Na tabela 4 estão apresentados os defeitos mais recorrentes em estradas de mina (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2010 *apud* REIS, 2014).

Natureza	Defeito	Descrição
Deterioração da superfície	Defeito na seção transversal	Falha na inclinação transversal para direcionamento de drenagem.
	Poeira	Suspensão de particulados devido desprendimento de material fino da camada de revestimento
	Caráter pedregoso	Material granulado na superfície da estrada
	Perda de material grosso	Material granular sobre a superfície da estrada
	Estrada escorregadia	Estrada úmida: volume considerável de finos; Estrada seca: Falta de material fino coesivo na superfície.
Deformação da superfície	Afundamento por trilho de roda	Afundamento no local de passagem dos pneus dos veículos
	Corrugações	Ondulações na pista
	Depressões	Áreas baixas localizadas
	Buracos	Cavidade de pequenas dimensões na pista
	Pontos Fracos	Drenagem deficiente e com isso o material da estrada fica enfraquecido

Tabela 4 - Principais defeitos encontrados em estradas de mina

Fonte: Oliveira et. al (2010a) *apud* Reis (2014).

Oliveira Filho *et al.* (2010c) *apud* Reis (2014) relatam que existe uma frequência nas intervenções de manutenção em estradas relativamente alta, mas isso se justifica, pois, as condições das pistas impactam diretamente na segurança do caminhão, na saúde ocupacional do operador, no tempo de ciclo, produtividade, no consumo de combustível e na vida útil de componentes. As atividades de conformação e adequação de pistas através de patrolagem de rotina diária. A Figura 15 apresenta um ábaco que auxilia na tomada de decisão na intervenção de manutenção nas estradas.

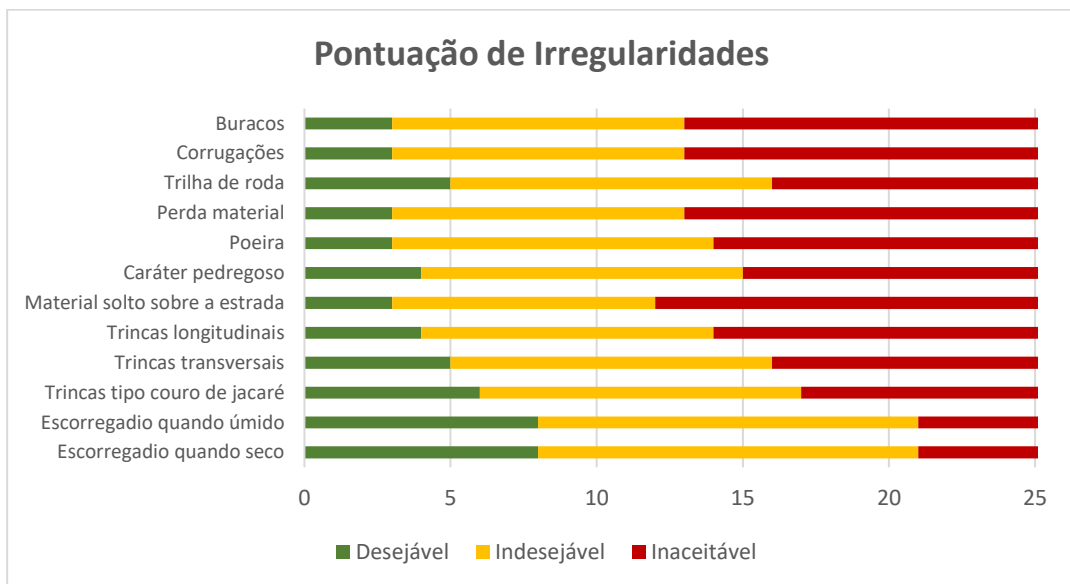


Figura 15 - Ábaco para a definição do momento a se intervir na estrada

Fonte: Reis (2014).

2.7 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DO PAVIMENTO

Para Sousa (2011) nos últimos anos os métodos de dimensionamento da camada do pavimento têm sido estudados com o intuito de adaptá-los à realidade local. Algumas variáveis tais como litologias, topografia, fatores climáticos, vegetação local e o porte de equipamentos, tem uma influência grande na gestão das estradas de mina. Existem dois métodos de dimensionamento de pavimentos os empíricos e os mecanístico-empíricos. O método empírico é baseado em observações, tentativas e experiências previamente realizadas em campo, já o método mecanístico-empírico é fundamentado em modelos matemáticos.

2.7.1 Métodos empíricos

A metodologia empírica para dimensionamentos das camadas do pavimento tem como base testes experimentais repetitórios e avaliação em campo. A abordagem do método empírico é determinística, ou seja, assume-se que os parâmetros estudados são fixos e únicos. Aplicabilidade do método empírico restringe-se as particularidades relativas a condições climáticas, tipos de materiais e pavimentos, características geomorfológicas e condições de carregamento (SOUSA, 2011).

2.7.2 Métodos mecanístico – empíricos

Para Sousa (2011), os métodos de dimensionamento de pavimentos mecanístico-empíricos, conhecidos também de teórico-experimentais, são baseados em modelos matemáticos e para análise estrutural são utilizadas técnicas computacionais. Os programas computacionais permitem analisar o pavimento de acordo com modelos elasto-lineares ou elasto-não-lineares de materiais granulares constituintes das camadas, obtendo informações de suas tensões e deformações.

2.8 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DE CAMADAS DE BASE E SUB-BASE

A Tabela 5 mostra os requisitos mínimos para definir os materiais para construção da camada do pavimento (REIS, 2014).

Propriedade	Camada			
	Subleito	Reforço do Subleito	Sub-base	Base
CBR	-	Maior que o do subleito	$\geq 20\%$	$\geq 80\%$
Expansão	$\leq 2\%$	$\leq 1\%^*$	$\leq 1\%^*$	$\leq 0,5\%^*$

Índice de Grupo	-	-	0	-
Limite de Liquidez	-	-	-	≤ 25%
Índice de Plasticidade	-	-	-	≤ 6%

Tabela 5 - Requisitos para camadas estruturais

Fonte: Reis (2014).

Sousa (2011) estuda a seleção de materiais que possibilita uma melhor compactação para a construção de forro em estradas de mina. O objetivo do projeto é a verificação de uso de materiais mais apropriados, e encontrados em minas de ferro para compor a camada do pavimento, conforme mostra na Tabela 6.

Material	CBR (%)	Expansão (%)	Índice de plasticidade
Itabirito Compacto	80	-	-
Canga Laterítica	26	-	-

Tabela 6 - Propriedades geotécnicas de possíveis materiais de construção

Fonte: Sousa (2011).

Os materiais de construção típicos destas camadas são granulares, por apresentarem em geral maiores resistências e menores deformabilidades quando compactados.

2.9 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DE CAMADAS REVESTIMENTO

Segundo Sousa (2011), a seleção dos materiais para revestimento é diferente daquela considerada para as outras camadas do pavimento. Neste caso, além das exigências gerais, algumas ponderações têm que ser levadas em consideração, dado as condições operacionais aos quais apenas o revestimento é submetido, como controlar a poeira, suavidade ao tráfego, aderência e resistência ao rolamento. Além disso, para essa

camada é exigida a utilização do melhor material disponível, visto que ela recebe as ações de desgaste e as maiores cargas dinâmicas causadas pelo tráfego dos veículos.

Para Thompson e Visser (2000), estudaram vários defeitos existentes nas estradas tais como buracos, ondulações sulcos, material solto, pedras soltas, rachaduras e resistência à derrapagem, e correlacionou esses defeitos com taxa de emissão de poeira, índice de plasticidade, CBR, coeficiente de classificação e estabeleceu especificações de materiais apresentados na Tabela 7

Propriedade	Min.	Max.	Impacto na funcionalidade
Encolhimento	85	200	reduzir o escorregamento
Coeficiente de classificação	20	35	reduzir a erodibilidade
Relação poeira	0.4	0.6	reduzir a geração de poeira
Limite líquido (%)	17	24	reduzir o escorregamento
Limite de plasticidade (%)	12	17	reduzir o escorregamento
Índice de plasticidade	4	8	reduzir o escorregamento
CBR (%)	80		melhora a trafegabilidade
Tamanho da partícula (mm)		40	facilitar a manutenção

Tabela 7 - Propriedades de materiais recomendadas para revestimento

Fonte: Traduzido de Thompson e Visser (2000).

As características procuradas, como: pista com boa aderência, material com baixa desagregação e emissão de poeira, segurança operacional relacionados a derrapagem em pista seca ou molhada, entre outras, são observadas na Figura 16. O material ideal para revestimento deve ser selecionado dentro da Área de cor verde para aumentar as condições de segurança e operação. A Área de cor azul, entretanto, representa a qualidade “operacional” do material a ser usado para revestimento (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

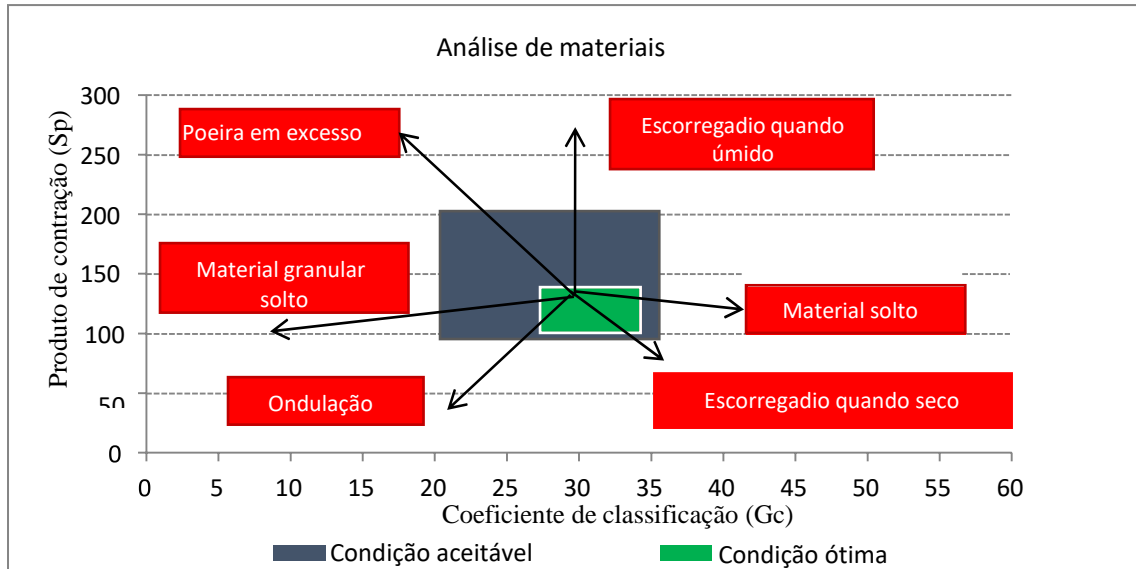


Figura 16 - Coeficiente de graduação para materiais de revestimento

Fonte: Tannant e Regensburg (2001).

2.10 VIDA ÚTIL DE ESTRADAS DE MINA

Oliveira Filho *et al.*(2010b) enfatizam no manual de estradas de mina, a importância de um sistema de classificação que auxilie na tomada de decisão por parte dos responsáveis pelas estradas, no sentido de possibilitar o controle dos mecanismos que levam à degradação da estrada e mitigação dos custos relativos à sua manutenção.

Para Reis (2014), as estradas de mina são definidas como permanentes e temporárias, as estradas permanentes são classificadas como acesso principal, já as estradas temporárias foram divididas como acesso secundário e acesso à praça, conforme apresentado na Figura 17.

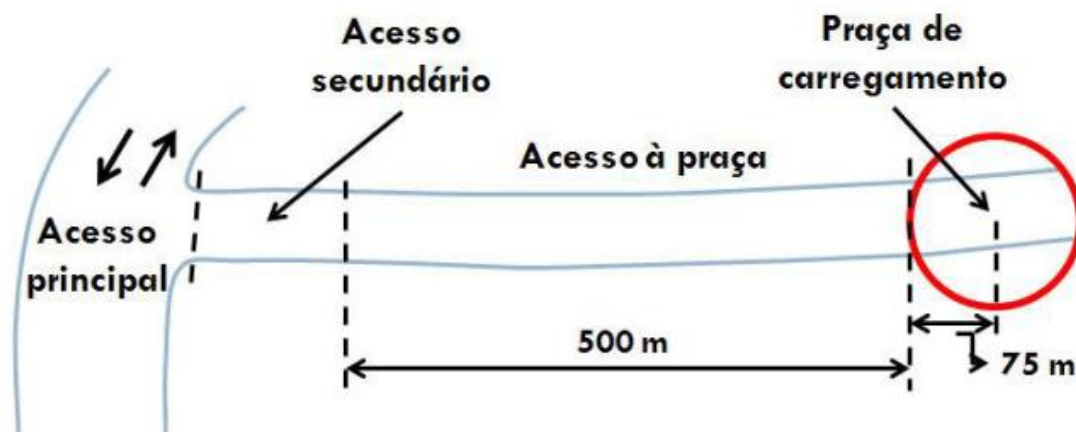


Figura 16 - Classificação de estrada de mina

Fonte: Reis (2014).

A classificação das estradas proposta por Reis (2014), subdivide as estradas em 3 classes, além de considerar o tempo de permanência, função e nível de serviço. Outro ponto positivo desta classificação está na definição do tempo de vida útil das estradas a ser definido na etapa de planejamento curto prazo, para nortear a equipe de execução no ato de sua construção, conforme ilustra na Tabela 7.

Classe	Vida útil	Função	Nível de serviço	Extensão
Principal	> 2 anos	Escoamento	Excelente	--
secundário	De semana a 2 anos	Lavra	Bom	--
Acesso à praça	Semanas	Lavra	Adequado no curto prazo	< 500 m

Tabela 7 – Sistema de classificação de estradas de mina

Fonte: Reis (2014).

2.11 MÉTODO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

De acordo com Tannant e Regensburg (2001), o método CBR é uma abordagem que qualifica resistência à penetração de uma carga em uma determinada camada de solo

ou rocha. O percentual dessa resistência é denominado índice CBR ou índice de suporte Califórnia. Curvas empíricas, conhecidas como curvas de CBR relacionam a espessura de preenchimento requerida e a carga da roda aplicada para o valor de CBR do material. A utilização do método de CBR pode ser feita a partir de um ábaco, contendo curvas com os valores de CBR dos materiais ensaiados contra a espessura da camada para várias cargas de roda (SOUSA, 2011).

A Figura 18 retrata o ábaco com as curvas *California Bearing Ratio* com relações estabelecidas com a carga aplicada sobre espessura da camada de revestimento para um pneu do equipamento. A carga do pneu sobre o solo adotada para o dimensionamento do forro é dada pelo peso bruto do equipamento vezes 0,67 (percentual da carga bruta do equipamento atuante no eixo traseiro) dividido por 4 (quatro pneus no eixo traseiro) (THOMPSON; VISSER, 2014). Kaufman e Ault (1977) sugerem quando calculada a carga aplicada ao solo por pneu, seja aplicado um fator adicional de 20% sobre o valor quando o eixo possui duas rodas em cada lado, isso devido a superposição de forças aplicado ao solo. A equação 9 determina a carga que o pneu aplica sobre a camada do pavimento.

$$Cp = \frac{Pb \times 0,67}{4} \times 1,2 \quad (9)$$

Em que:

Cp = carga do pneu sobre o forro;

Pb = peso bruto do equipamento;

1,2 = corresponde a 20% adicional de carga devido a superposição de forças aplicadas ao solo, quando o eixo traseiro possui duas rodas de cada lado.

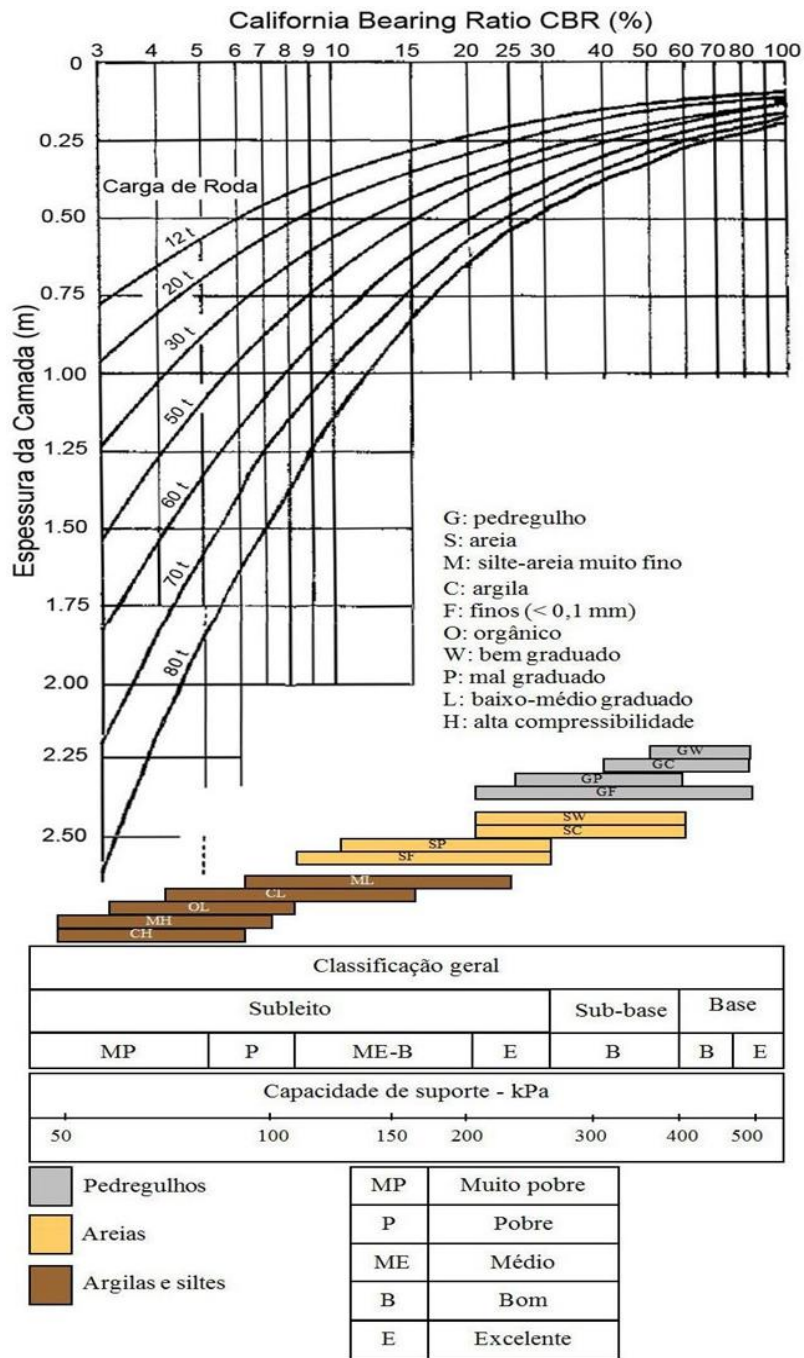


Figura 17 - Ábaco para dimensionamento de pavimento usando o CBR e carga de roda

Fonte: Sousa (2011).

Thompson e Visser (1996) *apud* Vieira (2013), no entanto chamam atenção para limitações desse método devido a ele assumir um módulo de elasticidade constante para os materiais e o método ter sido baseado em resultados empíricos de estradas públicas sujeitas a no máximo 800kN de carga por eixo, extrapolar o uso desse método em estradas de mineração pode levar a erros de dimensionamento das espessuras das camadas. O método CBR não leva em conta as propriedades do material de revestimento e assim determina-se a camada de revestimento por diferença entre o topo da camada total a ser construída e o topo da camada de base projetada (SOUSA, 2011).

2.12 CUSTOS DE LAVRA

Lopes (2010) relata que grande parte das minas que operam pelo método convencional de lavra por caminhões tem a composição de seus custos de lavra divididos conforme Figura 19, onde observa-se a maior parte dos custos (52%), é ocupada pelo custo com o transporte de caminhões.

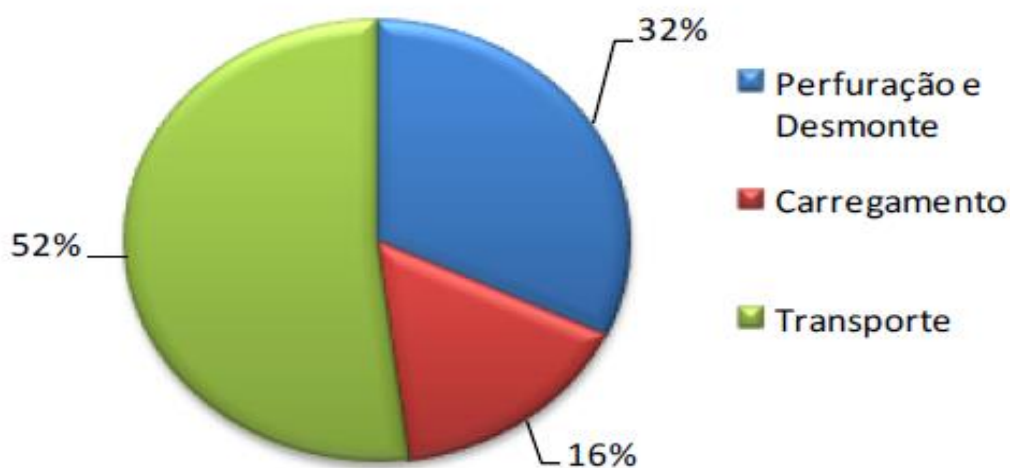


Figura 18 - Distribuição dos custos da lavra convencional por caminhões

Fonte: Lopes (2010)

Segundo Curi (2014), o aumento na distância média de transporte (DMT) em função do aprofundamento da mina, causa aumento no custo de lavra em consequência do aumento do custo de transporte. RIBEIRO (2013) pondera que o preço de óleo diesel é o que mais tem influência no aumento de custo operacional de lavra.

De acordo com Lopes (2010), o consumo de diesel eleva os custos com transporte, então fazer a gestão de consumo de energia, geralmente de origem fóssil, mitiga custos operacionais em caminhões. Na Figura 20, é apresentada a participação do custo com combustível nos custos de operação de uma mina de ferro de grande porte operada pelo método convencional de lavra por caminhões.

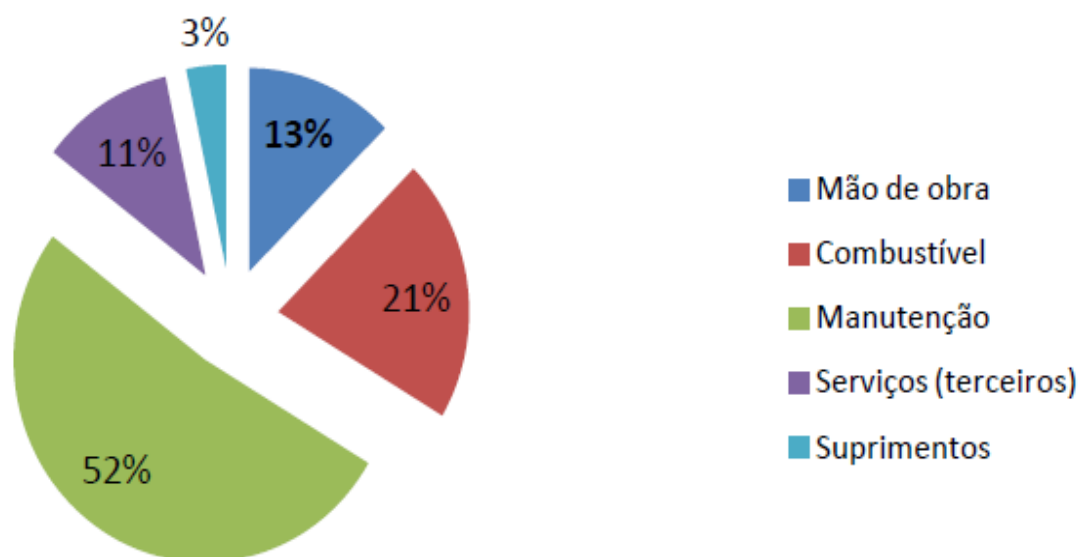


Figura 19 - Divisão dos custos de operação em uma mina de ferro de grande porte

Fonte: Felsch Junior (2014)

Ribeiro (2013) evidencia que é fundamental que as mineradoras tenham compromisso com preservação ambiental na sustentabilidade das empresas de mineração. Lopes (2010) comenta que existe uma pressão social para a redução das emissões de carbono na atmosfera, que estão associadas ao consumo de diesel. As condições de

estradas estão diretamente ligadas ao consumo de combustíveis e de pneus em uma mina a céu aberto. A granulometria e abrasividade dos materiais utilizados para compor as camadas do pavimento, definem as principais características para selecionar os materiais. Em períodos de chuva as características mineralógicas da camada de material utilizado superficialmente para acabamento dos acessos, geram condições mais propícias para corte e desgaste da banda de rodagem (VIEIRA, 2013).

Capítulo 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste estudo os materiais envolvidos incluem a mina estudo de caso, com sua estrutura a estrada da mina, equipamentos de transporte, materiais usados para construção da camada de forro da estrada, além de dados de operacionais e de gestão.

Após constatada a necessidade de uma melhoria na qualidade das estradas da mina com foco no aumento da produtividade e redução dos custos de transporte, foi realizado um diagnóstico da situação atual das estradas na mina seguido da verificação de possíveis ajustes. Para realização deste diagnóstico adotou-se a metodologia descrita abaixo.

Segundo definição de Thompson e Visser (2008), o desempenho operacional dos equipamentos de transporte depende de quatro etapas, do projeto geométrico, do projeto estrutural, do projeto funcional e a gestão de intervenção para manutenção. A representação gráfica na Figura 21 ilustra o processo para o dimensionar e verificar a aderência nas execuções dos projetos geométricos, estrutural e funcional de uma estrada de mina. As etapas são ilustradas em formato de fluxograma, de maneira encadeada através de símbolos geométricos interconectados, para a correta aplicação do método deve-se seguir o fluxo de informações na ordem cronológica do processo.

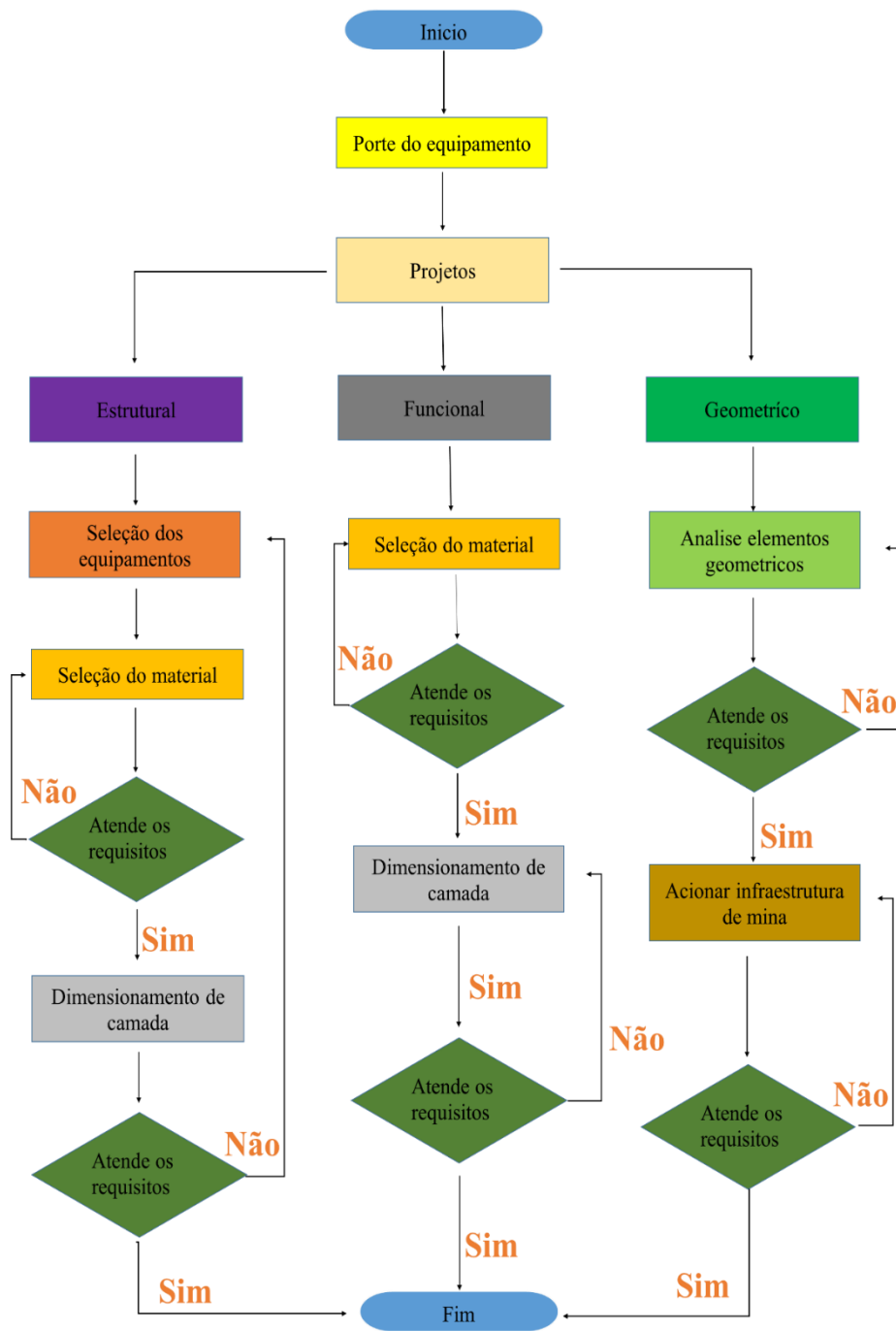


Figura 20 – Fluxograma para dimensionamento de estradas

Fonte: Própria

Na primeira etapa do processo, é necessário especificar o porte do equipamento que irá transitar pelas estradas. O dimensionamento geométrico é a etapa do processo que trata da avaliação das condições de geometria que a estrada está submetida. Para tal, é feita uma verificação de itens relativos aos cálculos da geometria da estrada, tais como: a largura, a altura de leira, inclinação de rampa entre outros. A etapa de dimensionamento estrutural traduz-se nas discriminações das espessuras de camadas do pavimento da estrada, levando em conta os valores de resistências dos materiais que serão utilizados. A etapa de dimensionamento funcional refere-se a escolha dos materiais que serão utilizados como camada de revestimento, a qual deve atender requisitos de baixa emissão de poeira no período de seca e de uma boa aderência na época chuvosa.

3.1 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO

Este tópico é voltado à apresentação de materiais e de metodologias utilizadas para o dimensionamento das camadas de base, sub-base e revestimento do pavimento de uma estrada mina a céu aberto através do método CBR.

Para dimensionamento das camadas utilizando o método CBR, recomenda-se seguir as etapas simplificadas:

1. Obtenção do CBR;
2. Especificação do equipamento, no estudo de caso trata-se de um - CAT 793;
3. Cálculo da carga de roda: Considera a carga de roda do caminhão mais pesada. A carga máxima por roda foi o eixo traseiro correspondendo a 67 % da concentração da massa bruta do equipamento;
4. Dimensionamento da espessura total do pavimento;
5. Dimensionamento da espessura da camada de sub-base;
6. Dimensionamento da espessura da camada de base;

7. Dimensionamento da espessura da camada de revestimento.

3.2 SELEÇÃO DO MATERIAL PARA CONSTRUÇÃO

Na Tabela 8, apresenta as propriedades geotécnicas de materiais encontrados na mina.

Litologias	CBR %	Expansão %	Índice de plasticidade
Cascalho de Itabirito	89.7	0.018	NP
Cascalho de Mina	Entre 45 e 67.8	0.12	-
Itabirito Pobre	71.06	0	-
Areia Laterítica	37.72	0.2	-
Canga Contaminada com Minério	75	0.2	-
Rejeito de Jigagem	34	-	-
Itabirito Compacto	80	-	-
Canga Laterítica	26	-	-
Argila	3	-	-

Tabela 8 - Propriedades geotécnicas de materiais

Fonte: Reis (2014).

3.3 MONITORAMENTO DAS ESTRADAS

Para monitorar e avaliar as condições relacionadas aos aspectos geométricos das estradas da mina utilizou-se relatório emitido pela VBOX e imagens aéreas captadas utilizando drones da própria empresa, conforme ilustra Figura 22. Para identificar situações operacionais que impactam na produtividade e segurança do equipamento.



Figura 21 – Monitoramento das estradas utilizando Drone.

Fonte: Própria.

Capítulo 4 - ESTUDO DE CASO

4.1 LOCALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A mina objeto de estudo está localizada no município de Congonha/MG no Quadrilátero Ferrífero e distância cerca de 80 km da capital do estado.

Para escoamento da produção são utilizados caminhões fora de estrada modelo Caterpillar 793, com capacidade de transportar 240 toneladas. A Tabela 9 mostra as especificações técnicas do caminhão.

variáveis	Informações técnicas	
	793 D	793 F
Acionamento	Diesel	Diesel
Peso operacional (kg)	383.749	386.007
Potência	2.337 HP	2.478 HP
Modelo motor	Cat 35168 HD EUI	Cat C175-16
Payload (t)	240	240
Cap. Tanque de diesel (l)	4.354	2.839
Altura (m)	6,494	6,603
Comprimento (m)	12,862	13,702
Largura (m)	7,680	8,295

Tabela 9 - Especificações técnicas CAT 793

Fonte: Caterpillar (2016).

A velocidade máxima descrita no manual dos equipamentos e as limitações de segurança determinadas na mina são respeitadas. No geral, a velocidade máxima é 35 km/h caminhão vazio e até 28 km/h caminhão carregado.

4.2 RESULTADO

4.2.1 Especificações das estradas

O planejamento de mina longo prazo projeta as estradas levando em consideração o menor impacto para o desenvolvimento e otimizar os recursos minerais com o intuito de prolongar a vida útil da mina. O planejamento de mina curto prazo é responsável por uma definição mais assertiva dos traçados das estradas da mina já que está mais próximo da operação.

Os fatores condicionantes para especificações dos projetos geométricos das estradas de transporte em minas a céu aberto é o porte do equipamento que irá trafegar na estrada. Para atender à literatura técnica, as estradas da mina têm que ter uma largura mínima de 30 m de pista livre, conforme ilustra Figura 23, que recomenda como sendo de 3.5 vezes a largura do maior equipamento que transita na mina para pista de duas vias, já que o maior caminhão CAT 793 F que trafega na mina tem uma largura de 8,295 m.



Figura 22 - Largura das pistas

Fonte: Própria

4.2.2 Monitoramento das estradas

Através de imagens aéreas captadas via Drone e relatório emitidos pelo equipamento VBOX, identificou-se alguns problemas existentes nas estradas da mina relacionados ao projeto geométrico tais como Raio de curvaturas e interseções entre elementos geométricos (Trevos). Os problemas geométricos citados acima, tem impacto direto na produtividade do caminhão, influência na redução da vida útil dos pneus e interferência na saúde e segurança da operação.

Problemas relacionados a interseções entre elementos geométricos (trevos), incluindo a falta de sinalização, pouca visibilidade e *layout* mal definido, podendo ocasionar acidentes, e impacto na velocidade e produtividade dos caminhões, conforme ilustra a Figura 24.



Figura 23 - Problemas com interseções entre elementos geométricos

Fonte: Própria

Através de relatórios emitidos pelo VBOX, foi possível identificar outro problema também relacionado ao projeto geométrico, o raio de curvatura curto. Esse problema geométrico quando não sanados ou quando não implantadas medidas de controles, é categorizado como crítica, visto terem influência de aumento no consumo de combustível e de pneus. A Figura 25 mostra as curvas com as condições mais severas.

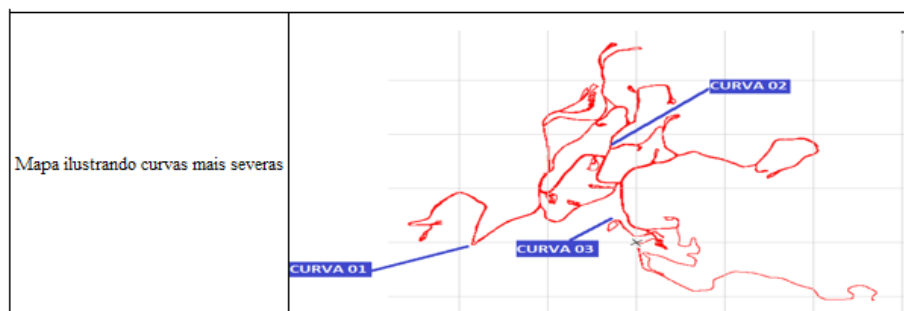


Figura 24 – Identificação das curvas mais severas

Fonte: Própria.

A inspeção visual, evidenciou outro problema, agora relacionado a segurança operacional, leiras de segurança lateral que não atendiam os requisitos mínimos de altura correspondente a metade do maior diâmetro do pneu que trafega na via, tornando-as inseguras ao tráfego de equipamentos. Ademais, embora existam leiras centrais para diferenciar mão e contramão, e orientar o fluxo nos acessos da mina, a altura da leira mediana não é eficaz para proporcionar a proteção necessária, uma vez que não tem a altura mínima exigida, conforme ilustra a Figura 26.



Figura 25 - Leira de segurança (Lateral e Central)

Fonte: Própria.

4.2.4 Boas práticas quanto à gestão

4.2.4.1 Projeto geométrico

O planejamento das estradas fica limitada as geometrias da mina voltado para otimização de lavra mais eficiente, propiciando oportunidades remotas para aplicação de técnicas na idealização de um projeto geométrico exclusivo para atendimento as estradas de mina. No entanto, mesmo que limitadas, existem pontos que proporcionam aplicações de técnicas para obter ganhos.

Na mina, foi evidenciado através do monitoramento e inspeções visuais alguns problemas relacionados ao projeto geométrico tais como: interseções entre elementos geométricos (trevos), raio de curvatura curto e leiras fracas (baixas). Esses problemas podem oferecer um maior esforço para os pneus, e um aumento significativo no consumo de combustível, e pode ter impacto negativo na segurança e saúde dos empregados, e para proporcionar uma operação mais segura e econômica, deve-se buscar soluções para esses problemas.

Problema geométrico relacionado a interseções entre elementos geométricos (Figura 24), a Figura 27, apresenta o projeto e adequação do trevo.

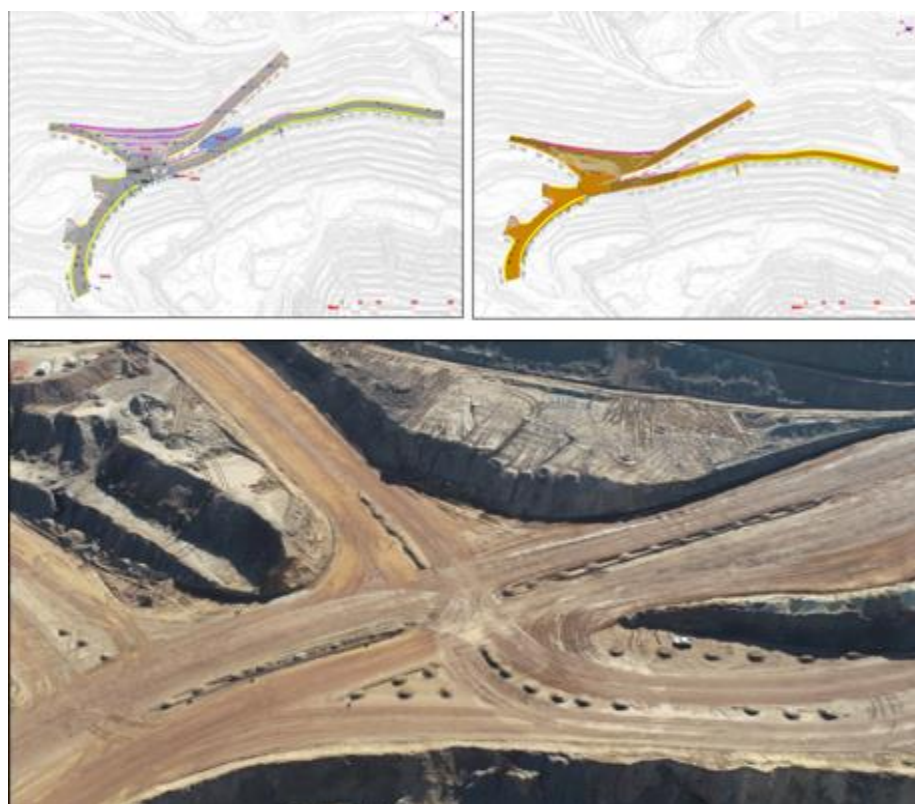


Figura 26 - Projeto e adequação do trevo

Fonte: Própria

Problema relacionado a raio de curvatura curto (Figura 25). Entretanto, devido às limitações de cava, nem sempre é possível realizar adequações, principalmente relacionados aos raios de curvatura. Para esses trechos a velocidade realizada foi reduzida em função do raio de curvatura, conforme ilustra a Tabela 10.

Curva	Raio de curvatura (m)	Velocidade indicada (km/h)	Velocidade realizada (km/h)
1	63,3	20	13,2
2	63,3	20	14,8
3	48,8	15	14,3

Tabela 10 - Raio de curvatura x Velocidade

Fonte: Própria

Após implantação de medidas de controles, não foram constatados alarmes de aceleração lateral, conforme ilustra a Figura 28. A força de aceleração lateral dos pneus limita-se a 0.15 G.

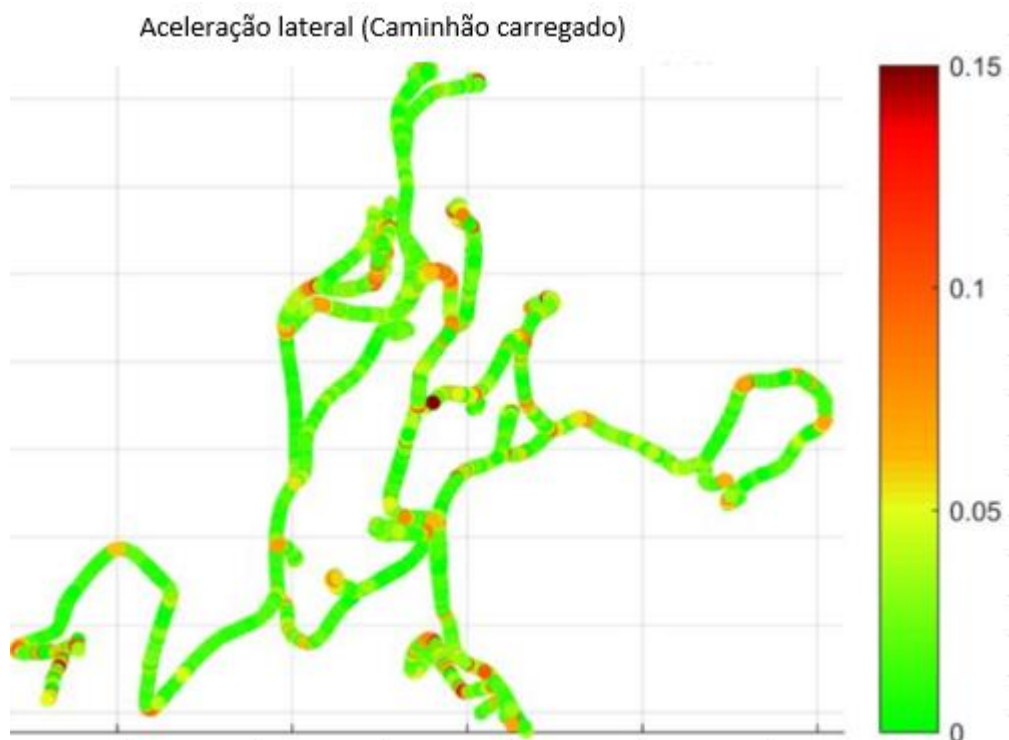


Figura 27 - Mapa de aceleração lateral

Fonte: Própria

As leiras identificadas como fora do padrão de segurança, ou seja, leiras baixas (Figura 26). A Figura 29 mostra as leiras conformadas, atendendo a uma altura da metade do maior pneu que transita na mina, dentro dos padrões de segurança da empresa.



Figura 28 - Leira lateral dentro dos padrões de segurança da empresa

Fonte: Própria

O monitoramento das estradas possibilitou também mapear e estudar locais na mina para redução de DMT (Distância média de transporte) seja na retificação de estradas, ou até mesmo na mudança de seu traçado, sendo de interesse da empresa. A Figura 30 ilustra detalhadamente esse cenário.



Figura 29 - Redução de DMT

Fonte: Própria

4.2.4.2 Projeto de Pavimento (Situação atual)

As técnicas utilizadas para selecionar os materiais e dimensionar as camadas estruturais do pavimento são realizadas com definições empíricas. Enfim, observa-se uma inexistência de critérios no âmbito operacional para definições das classes das estradas.

A seleção de materiais para as camadas estruturais do pavimento (base, Sub-base e revestimento) é restrita à disponibilidade destes na própria mina e que são, geralmente, oriundos das operações de lavra e de desenvolvimento. Observa-se a inexistência de procedimento para dimensionamento das camadas do pavimento, de gestão da disponibilidade de materiais competentes para construção das camadas das estradas e, posteriormente, da utilização destes materiais com técnicas mais adequadas para as construções das camadas.

4.2.4.3 Boa Prática recomenda

Os materiais para a construção das camadas de base e sub-base são compactos e granulares, por apresentarem características mais resistentes e quando compactados não se deforma facilmente. Um problema comum, relacionado a materiais granulados, é a heterogeneidade e disponibilidade de materiais competentes. Materiais de forro nas estradas geralmente apresentam uma variabilidade alta em função da transição de material não compacto nas frentes de lavra.

Para controlar a variabilidade dos materiais de forro, a utilização de software de planejamento de mina foi fundamental para mapeamento de materiais adequados para construção das camadas de base e sub-base disponíveis dentro da mina. Com auxílio de ensaios CBR de estudos anteriores, foi possível selecionar os materiais com 80 % de CBR (Itabirito Compacto) dentro de suas características e competências geotécnicas, conforme Figura 31.

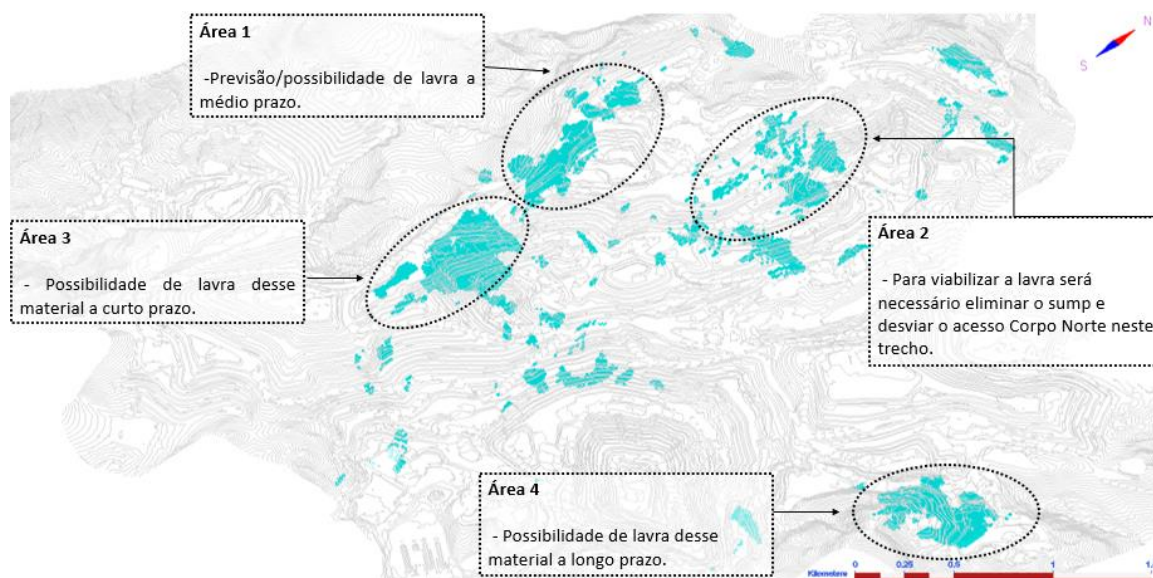


Figura 30 – Filtro de materiais compactos

Fonte: Própria

A Figura 32 ilustra os materiais granulados disponíveis na mina que podem ser utilizados na formação de camadas de base e sub-base. Entretanto, a preferência se dá para o itabirito compacto em detrimento a outros materiais, uma vez que apresenta melhor resultado na compactação e resistência.



Figura 31 – Itabirito Compacto

Fonte: Própria.

A Figura 33 ilustra o Itabirito Brando material com característica para construção da camada de revestimento.



Figura 32 – Itabirito Pobre Brando

Fonte: Própria.

O itabirito pobre brando se mostra mais apropriado para ser usado como revestimento, pois fornece melhor sustentação e compactação. Além disso, é mais

abundante na mina e garante, no período chuvoso, que os acessos ficam menos escorregadios, em função de ser mais abrasivo. Entretanto, um ponto de atenção para utilização deste material é a geração de particulados no período seco.

4.2.4.4 Projeto de drenagem (Prática atual)

O sistema de drenagem é realizado pelo planejamento de curto prazo, como tem que ser. Ao avaliar as condições de drenagem notou-se a falta de definição sobre drenagem de estradas, drenagem de praças de carregamento e drenagem de pilhas de estéreis.

No que diz respeito a drenagem na praça de carregamento, notou-se a falta de gerenciamento de água nas praças, a ausência de saídas d'água e de uma inclinação longitudinal de 1% , conforme Figura 34, que constitui o elemento de drenagem da praça para direcionar o fluxo sentido inverso do local de carregamento foram observadas. Ao se avaliar a drenagem dos acessos, notou-se a ausência de bacias/caixas de dissipações, construídas na lateral dos acessos e rampas, caminhos naturais para escoamento da água até a cava, para redução da energia da água.



Figura 33 – Ausência de drenagem na praça de carregamento

Fonte: Própria.

4.2.4.5 Boa Prática recomendada

O principal objetivo, realizar a gestão do fluxo de água e evitar saturação das pistas, formação de poças d'água e erosões. Desta forma, foram executados direcionamentos transversais de drenagem nos acessos com direcionamento d'água para um só lado e abaulamento de pistas direcionando o fluxo d'água para ambos os lados. A construção de caixas / bacias de dissipação nas laterais dos acessos foi executada. Tais saídas provocam quebra de velocidade da água, evitando erosões na estrada, conforme Figuras 35.

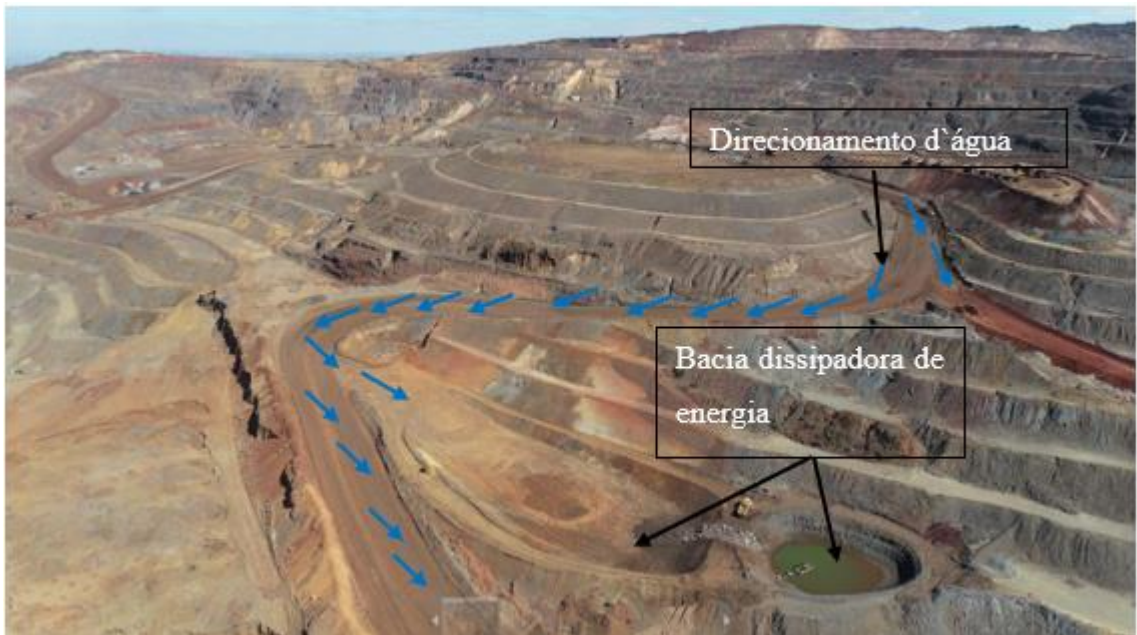


Figura 34 - Direcionamento de águas pluviais nas estradas

Fonte: Própria.

As águas pluviais são direcionadas para o fundo da cava, com finalidade de promover a decantação de material fino, para viabilizar o bombeamento de água limpa, conforme ilustra a Figura 36.



Figura 36 - Sump para drenagem da água

Fonte: Própria.

O projeto de drenagem é idealizado pelo planejamento de curto prazo com integração da geotecnia, e são executados no período seco pela área de infraestrutura, conforme ilustra a Figura 37.



Figura 35 - Drenagem de bancos

Fonte: Própria.

4.2.4.6 Gerenciamento da manutenção (Prática atual)

A gestão de manutenção de estradas tem por objetivo principal a melhoria da trafegabilidade dos equipamentos de transporte em termos de condições de rolamento e aderência de piso das estradas. Nivelamento, escarificação da superfície, reposição e substituição de material de revestimento, correção pontual de borrachudos por obturação e umidificação das pistas, são os procedimentos operacionais mais comuns. Para

construção e manutenção das estradas são utilizados equipamentos de infraestruturas tais como monitoniveladoras, trator de pneus e trator de esteira.

4.2.4.7 Inspeção de Pista

A inspeção de pista é realizada semanalmente com o intuito de avaliar em campo as condições operacionais de vias e acessos, através de evidências fotográficas. Os defeitos mais comuns encontrados na pista a presença de pedras, deformações, material solto na pista, corrugações e trilha de pneus, conforme apresenta a Figura 38. Esses defeitos podem causar desgaste prematuro dos pneus por impactos e cortes.





Figura 36 - Defeitos encontrados nas estradas

Fonte: Própria.

- a) deformações, b) borrachudo, c) corrugações d) afundamento de trilhas de rodas e) ondulações e f) presenças de matacos (pedras).

4.2.4.7 Ações implementadas

Após os levantamentos e identificação dos defeitos nas estradas, as ações corretivas foram implementadas para corrigir esses defeitos, conforme mostra a Figura 39.



Figura 37 - Adequação das estradas

Fonte: Própria.

a) adequação de camada de forro, b) conformação de leira, c) patrolamento de pista d) pista conformada

4.2.4.8 Controle de poeira

Caminhões pipas (rodoviários) e aspersão fixa são utilizados para gerenciar a emissão de poeira proveniente da circulação dos equipamentos nas vias. Para controlar os particulados proveniente de taludes são utilizados produtos à base de polímeros através de caminhão pipa adaptado, conforme Figura 34.



Figura 38 - Umidificação de estradas e taludes

Fonte: Própria.

4.2.4.8 Classificação das estradas

Conforme preconiza Reis (2014), as estradas da mina foram divididas em três classes:

- Estrada principal: São acessos com vida útil superior a 2 anos, e primordiais para o escoamento da produção, sendo para alimentação de minério no britador ou deposição de estéril nas pilhas de estéreis;

- Estrada secundária: São acessos periféricos, com sua vida útil inferior a 2 anos, e com função para desenvolvimento de uma ou mais frente de lavra;
- Estrada à praça: São acessos no máximo de 500 m, com sua vida útil de semanas, e com função para desenvolvimento de uma frente de lavra, estoque de ROM e pilha de estéreis.

Após dividir as classes das estradas da mina, as estradas foram classificadas como:

- Estrada Horizontal (Plana): Estradas com baixo risco de deslizamento de caminhão;
- Estrada Vertical (Rampa): Estrada com alto risco de escorregamento de caminhão quando úmido, onde existe um maior atrito do pneu do caminhão com as camadas do pavimento.

4.2.4.9 Resultado

Após o monitoramento das estradas via drone, foi possível reduzir cerca de 839m a DMT em dois pontos das estradas, conforme ilustra a Figura 41.

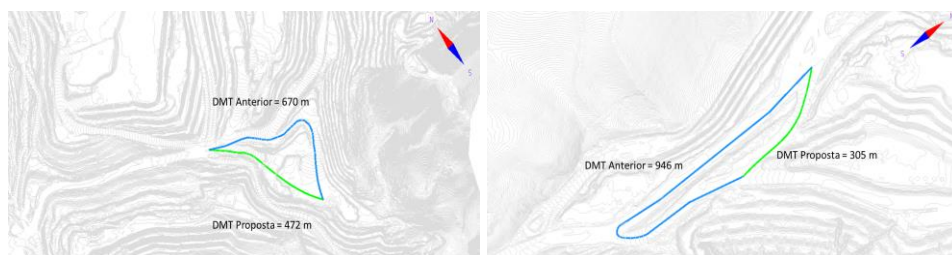


Figura 39 – Redução de DMT após monitoramento

Fonte: Própria.

Durante a execução dos ciclos, os caminhões são submetidos a curvas que exigem um grande trabalho mecânico dos pneus, e podendo ainda ocorrer aceleração lateral (arraste lateral), que é consequência da relação entre o raio de curvatura e a velocidade que este é realizada. Com a limitação de velocidade para execução das curvas, em função da impossibilidade de realizar as adequações em alguns trechos, eliminou se os alarmes de ocorrências de aceleração lateral acima do limite máximo admissível (0.15G), verificado através de monitoramento e relatório emitidos pelo VBOX, conforme Figura 42.

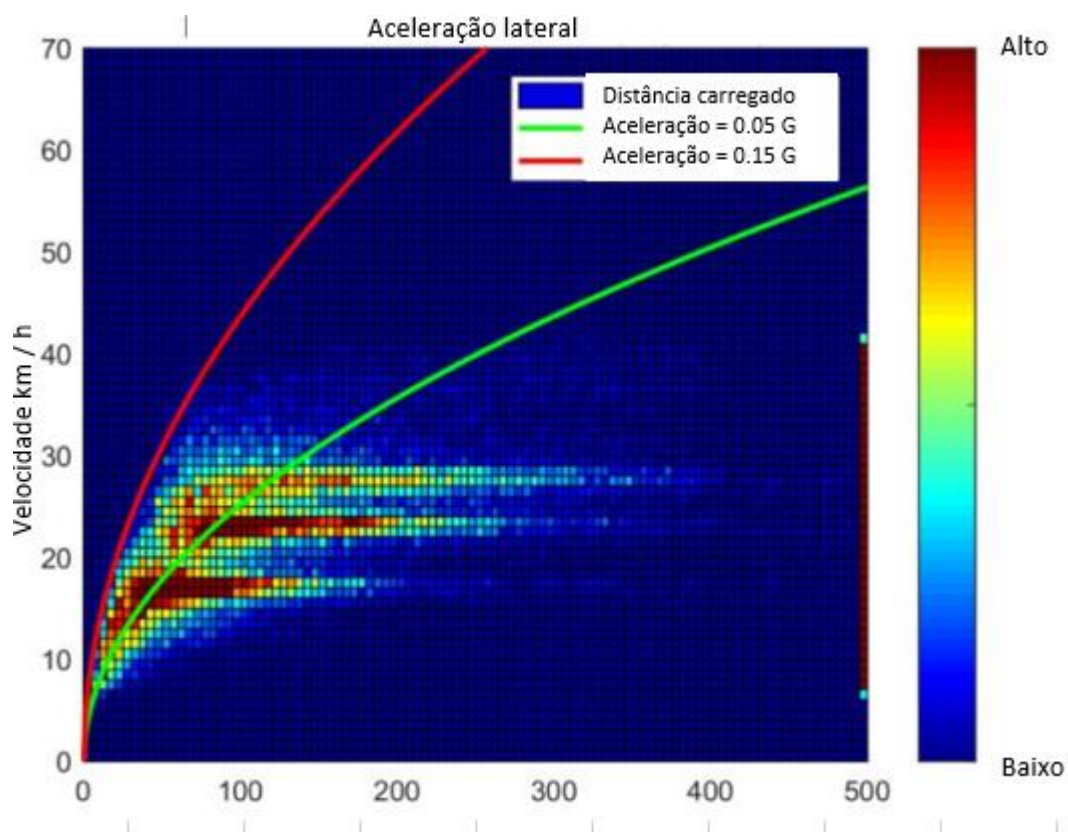


Figura 40 - Monitoramento de aceleração lateral

Fonte: própria

Para obter a espessura das camadas foi aplicado método de carga de roda que foi dimensionado a partir do ábaco contendo curvas com os valores de CBR dos materiais. O estudo em questão utiliza para construção das camadas de revestimento, base e sub-base, materiais encontrados dentro do limite operação de cava.

A Tabela 11 mostra o cálculo do dimensionamento das camadas de base, sub-base e revestimento de estradas, utilizando o método CBR. Para cálculo foi considerado a argila, material com pior CBR e estimado em 3%.

Caminhão de capacidade de carga de 240 ton	
Peso bruto do veículo:	386.007 kg
Número de eixos:	2
Número de pneus eixo dianteiro:	2
Número de pneus eixo traseiro:	4
Peso caminhão carregado:	Eixo dianteiro: 33% Eixo traseiro: 67%
Carregamento máximo por eixo:	Eixo dianteiro: 127.382,31 kg Eixo traseiro: 258.624,69 kg
Carregamento máximo por pneu:	Pneus eixo dianteiro: 63.691 kg Pneus eixo traseiro: 64.656 kg
Carga de pneu sobre o forro:	77.587 kg
Determinação da espessura total da camada de forro	
Carga de roda	77.587 kg
CBR solo argiloso	3%
Espessura total	2,30 m
Determinação da espessura da camada de sub-base	
Carga de roda	77.587 kg
CBR sub-base	26%
Espessura total	1,80 m
Determinação da espessura da camada de base	
Carga de roda	77.587 kg
CBR base	80%
Espessura total	0,30 m
Determinação da espessura da camada de revestimento	

Carga de roda	77.587 kg
CBR revestimento	75%
Espessura total	0,20 m

Tabela 11 - Dimensionamento do pavimento CAT 793

Fonte: Própria.

Observa-se que pelo dimensionamento apresentado, a espessura total das camadas a serem construídas é de 2,30 m. Mas, através da prática de campo, verificou-se que a espessura 1,5 m nas laterais e 1,8 m no centro apresenta um excelente resultado, quando a estrada é construída em plano vertical (Rampa), conforme ilustra Figura 43.

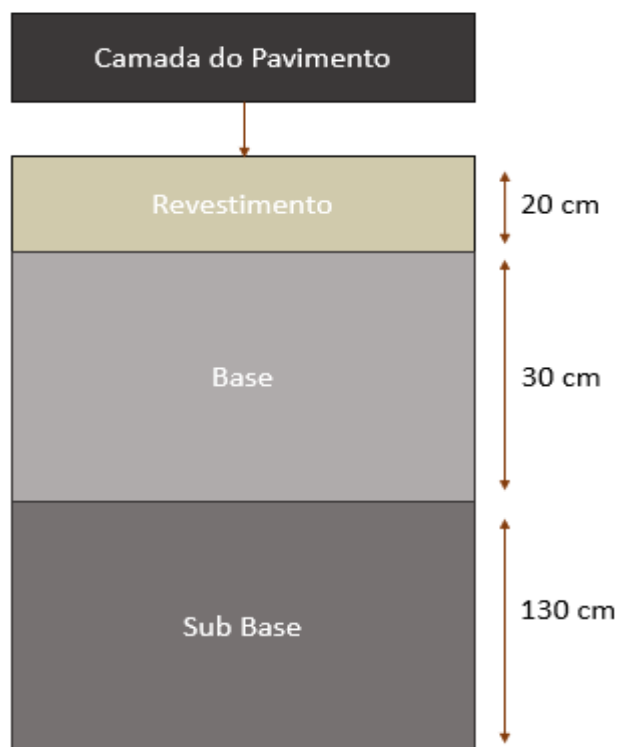


Figura 41- Dimensionamento da camada do pavimento plano vertical

Fonte: Própria.

Na prática de campo, verificou-se que as estradas quando construídas em plano Horizontal (plana), a espessura da camada do pavimento nas laterais da estrada 1,2 m e 1,5 m no centro apresenta um excelente resultado, conforme ilustra a Figura 44.

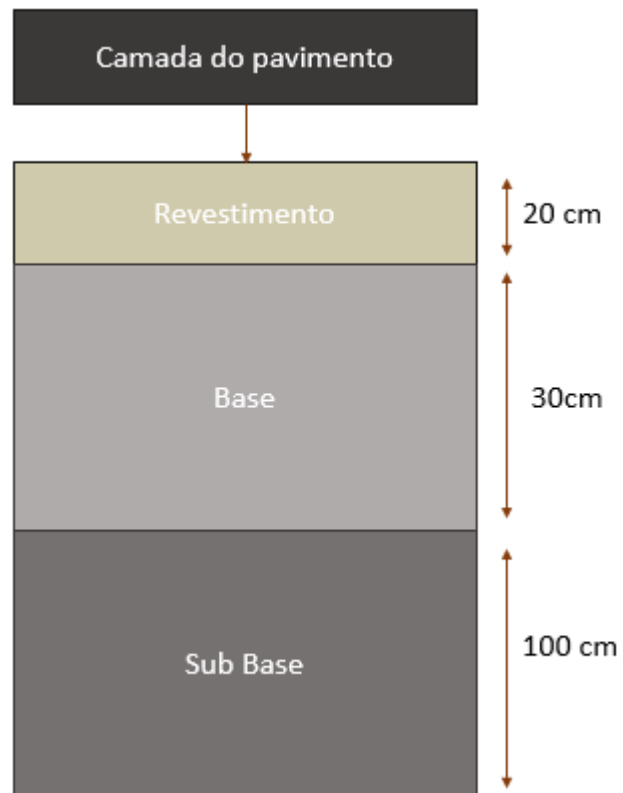


Figura 42 - Dimensionamento da camada do pavimento plano horizontal

Fonte: Própria

Capítulo 5 - CONCLUSÕES

A avaliação da estrada de mina teve um diagnóstico bastante amplo, contemplando e atendendo os parâmetros relativos de dimensionamento dos projetos geométricos, estrutural, funcional e de drenagem. Essa abrangência tem um papel importante para entendimento da situação de estradas em minas a céu aberto. Este diagnóstico trouxe também um aprofundamento apresentado pelo estudo de estradas de mina que haveria um ganho relacionado aos custos de operações e na segurança operacional.

A revisão bibliográfica das características físicas das propriedades básicas dos materiais utilizados em campo também foi extremamente importante para auxiliar os estudos de dimensionamento de projeto geométrico, estrutural, funcional e drenagem, transpondo-os de forma mais próxima à realidade. A admissão de metodologia de estradas de mina contribui positivamente no desempenho dos equipamentos de produção, mitiga os custos e permite o negócio mais sustentável e constante.

O estudo de dimensionamento explorou as possibilidades de um projeto estrutural de pavimento em estradas de mina, determinado pela resistência dos materiais *in-situ* através da relação do *California Bearing Ratio* (CBR). Para o projeto funcional, concluiu-se que o material utilizado atualmente na mina, denominado itabirito pobre, traz as características desejadas de boa aderência, boa agregação de materiais, baixo efeito de derrapagem por material solto em ambiente, obtendo assim um bom rendimento para o tráfego de equipamentos.

A gestão de manutenção depende do intervalo ideal para sua intervenção uma vez que varia em função da frequência de tráfego na estrada, principalmente em função de seus materiais de construção e das condições de seu sistema de drenagem. A manutenção e conservação das vias mostram grande relevância para garantir a suavidade no tráfego dos caminhões e, conseqüentemente, o desempenho operacional dos equipamentos para escoamento da produção.

Os defeitos mais presentes encontrados e levantados nas inspeções de pistas foram as deformações e trilhas de pneus nas estradas, interferindo consideravelmente o resultado da resistência que a estrada oferece ao caminhão. A frequência de defeitos dessa natureza, como causa da elevação da resistência ao rolamento, sugere a necessidade da revisão dos projetos estruturais das estradas para impedimento do surgimento e/ou correção dos defeitos.

A implementação de uma rotina de inspeção com controle semanal para quantificação do índice de defeitos e determinação da resistência ao rolamento pode fornecer à equipe de infraestrutura de mina condições para melhorar a estratégia de alocação de equipamentos para manutenção de estradas, conforme o grau de severidade encontrado, de forma que a equipe de operação trabalhe na melhor rota para tráfego dos equipamentos de transporte.

O monitoramento das estradas através de drone identificou problemas relacionados aos aspectos geométricos que podem influenciar no rendimento operacional dos equipamentos de transporte, que impacta na produtividade e segurança nas operações da mina. Possibilitou também, reduzir 839 m de DMT (Distância média de transporte) nas estradas, mitigando os custos operacionais da mina.

Os resultados apresentados na adequação das estradas de mina, mostra que para ter estradas eficiente e segura, é necessário investimento proporcional à importância das estradas para um bom funcionamento de uma mina. O dimensionamento demonstrou ser suficiente na mina estudada, proporcionando suavidade no trânsito e segurança operacional, que por sua vez influencia na produtividade dos equipamentos de mina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. **NR 22: Segurança e saúde ocupacional na mineração**. Brasília: Ministério do trabalho e emprego, 2019. Disponível em: <http://www.segurancaotrabalho.eng.br/nr/nr_22.pdf>. Acesso em 10 de setembro de 2021.
- CATERPILLAR. **Reference guide to mining machine applications**. Peoria: 2009. Field Guide Number AEXQ0030-02.
- CATERPILLAR. **Caterpillar Performance Handbook**. 46 ed. Illinois: Caterpillar Inc., janeiro 2016.
- COUTINHO H.L.; ALMEIDA C.M. **Utilização de correias transportadoras na mineração**. Semana de Estudos de Engenharia. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil, 2017.
- CURI, Adilson. **Minas a céu aberto. Planejamento de lavra**. Oficina de Textos. 2014. 223 p.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro: DNER, 1999. 195p.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 3.ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274p.
- FAMBRO, D. B.; FITZPATRIC, K.; KOPPA, R. **Determination of stopping sight distance**. Washington: National Academic Press, 1997. 138p
- HUGO, D.; HEYNS, P. S.; THOMPSON, R. J. & VISSER, A. T. **Haul road condition monitoring using vehicle response measurements**. Twelfth International Congress on Sound and Vibration, 8 p, Lisbon, 2005.
- JUNIOR, W.S.F. **Análise do desempenho dos operadores de equipamentos de mina e simulação de cenários futuros de lavra** – Estudo de caso (Mina Casa de Pedra – Congonhas / Mg). 2014, 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mina). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais.

KAUFMAN, W.W.; AULT, J.C. **Design of Surface Mine Haulage Roads - A Manual**. Pensilvania: Pittsburgh Research Laboratory Library. 1977.

LOPES, J. R. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com uso de sistema de britagem móvel “In Pit” autopropelido**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil. 2010.

OLIVEIRA FILHO, W. L.; FERNANDES G.; VAM HAM, G. H. J.; RODRIGUES, C. A.; MASETTI, L.; COSTA, W. **Manual de Drenagem em Minas de Minério de Ferro**. Ouro Preto, 2010a. 80 p.

OLIVEIRA FILHO, W. L.; FERNANDES G.; VAM HAM, G. H. J.; RODRIGUES, C. A.; MASETTI, L.; COSTA, W. **Manual de Estradas de Acesso de Mina**. Ouro Preto, 2010b. 183 p.

OLIVEIRA FILHO, W. L.; FERNANDES G.; VAM HAM, G. H. J.; RODRIGUES, C. A.; MASETTI, L.; COSTA, W. **Relatório de Inventário de Estradas de Acesso de Mina**. Ouro Preto, 2010c. 187 p.

PELLISSARI, F.P. **Projeto de Estrada para Mineração – Caracterização e Análise de Aplicação**. 2019, 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mina). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

REIS, M.S. **Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra à céu aberto de minério de ferro dentro do Quadrilátero Ferrífero**. 2014. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.

RIBEIRO, B.G.C. **Estudo de viabilidade econômica para a implementação de correias transportadoras de ROM de minério de ferro**. Estudo de caso da Mina Fábrica em Congonhas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil. 2013.

SILVA, A.E.G. **Análise de qualidade de estradas de mineração utilizando indicadores operacionais**. 2020, 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

SOARES DE SOUSA, L. M.; LOPES DE OLIVEIRA FILHO, W.; MOTA DE LIMA, H. Dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto. **Revista Escola de Minas**, vol. 65, núm. 2, p. 279-284, 2012.

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

SOUSA, L. M. L. S. **Estudos de dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil. 2011.

TANNANT, D. D.; REGENSBURG, B. **Guidelines for Mine Haul Road Design.** University of Alberta, Canada: School of Mining and Petroleum Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, 2001. 108 p.

THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. **Towards a mechanistic structural design method for surface mine haul roads. Journal of the South African institution of civil engineers.** South Africa, vol. 38 num. 2, p. 13-21, Segundo trimestre 1996.

THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. The functional design of surface mine haul roads. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, jun. 2000.

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

THOMPSON, R.; VISSER, A. **Mine Haul Road Design, Construction and Maintenance Management**, course notes given on May 2014 at Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014

THOMPSON, R.J.; VISSER, A.T. **The impact of rolling resistance on fuel, speed and costs: Continuous improvement case studies.** Rio Grande do Sul, 2006.

VIEIRA, J.C. **Determinação e quantificação de elementos de relevância em infraestrutura de mina.** 2013, 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mina). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Parauapebas.

