



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



**MARIANA QUEIROZ PINHO**

**CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS MINEIRAS E  
SISTEMAS DE DRENAGEM**

**OURO PRETO - MG**

**2015**

**MARIANA QUEIROZ PINHO**

**mqueiroz91@hotmail.com**

**CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS MINEIRAS E SISTEMAS  
DE DRENAGEM**

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

**Professor orientador:** Hernani Mota de Lima

**OURO PRETO - MG**

**2015**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO


Aos catorze dias do mês de julho de 2015, às 14 horas, na sala 16 do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS MINEIRAS E SISTEMAS DE DRENAGEM”**, pela aluna Mariana Queiroz Pinho, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof Dr. Hernani Mota de Lima (Orientador)**, **Prof. M.Sc. José Fernando Miranda e Eng<sup>a</sup> de Minas Andyara Pinto Duarte**.

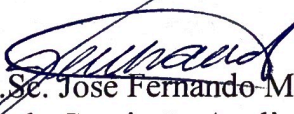
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela *aprovação* da candidata, com a nota *7,0* concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.


A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.


Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

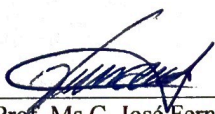
Ouro Preto, 14 de julho de 2015.

  
Prof. D<sup>a</sup>. Hernani Mota de Lima  
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador

  
Prof. M. Sc. José Fernando Miranda.  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Eng<sup>a</sup> de Minas Andyara Pinto Duarte  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Mariana Queiroz Pinho

  
Prof. Ms.C. José Fernando Miranda  
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por abençoar meu caminho. Aos meus pais, Lamir e Eloina, por não medirem esforços e me apoiarem em busca dos meus sonhos. A minha irmã Patrícia, pela dedicação. Ao meu irmão Guilherme pelo carinho. Aos amigos de Ouro Preto, pelo companheirismo e por tornarem esta jornada menos árdua. Aos professores do Demin, em especial o professor Hernani, pela dedicação e paciência. A UFOP e a FG por proporcionarem um ensino de qualidade. A grandiosa República Tanto Faz, ex-alunas, moradoras e a Madá, que se tornaram minha segunda família, pelo carinho, amizade e ensinamentos.

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta uma revisão bibliográfica com os principais elementos de um projeto para a construção e manutenção das estradas de uma lavra a céu aberto. São abordados: o projeto geométrico, estrutural e de drenagem, as técnicas de tratamento contra pó, manutenção e construção. Além disso, são abordados os principais tipos de sistemas de drenagem e apresentado um estudo de caso, retirado da tese “Estudos de dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto” (Sousa, 2011), onde são exemplificados os elementos de projeto citados no trabalho que aplicados nas estradas das minas da empresa VALE.

**Palavras-chave:** *estrada de mina, projeto geométrico, projeto estrutural, sistema de drenagem, TCP, construção, manutenção.*

## **ABSTRACT**

This thesis presents a literature review with the main elements of a project for the construction and maintenance of roads in an open-pit mine. The following topics are covered: geometric, structural, and drainage design, dust control techniques, maintenance, and construction. In addition, the main types of drainage systems are discussed and a case study is presented, taken from the thesis “Studies of structural design of open-pit mine roads” (Sousa, 2011), where the design elements cited in the work are exemplified applied in the roads of the mines of the VALE company.

**Keywords:** mine road, geometric design, structural design, drainage system, TCP, construction, maintenance.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Configurações geométricas indicando diferentes condições de segurança
- Figura 2 - Exemplo de perfil esquemático de largura de estrada para caminhão fora de estrada Caterpillar
- Figura 3 - Perfil esquemático de largura de estradas com elementos geométricos
- Figura 4 - Representação esquemática da superelevação
- Figura 4 - Formas de direcionamento da drenagem
- Figura 6 - Demonstração de greides
- Figura 7 - Exemplo de conformação entre trechos com diferentes inclinações para direcionamento de drenagem
- Figura 8 - Secção transversal de estradas
- Figura 9 - Precárias condições de tráfego impostas a uma estrada de mina, devido à excessiva geração de pó
- Figura 10 - Variação da geração de material particulado em uma estrada de mina após aspersão de água
- Figura 11 - Condições precárias de visibilidade devido à excessiva formação de poeira.
- Figura 12 - Corrugações na pista devido a ausência de manutenção
- Figura 13 - Valeta de proteção de corte
- Figura 14 - Seção Triangular de uma valeta de proteção de corte
- Figura 15 - Seção retangular
- Figura 16 - Seção trapezoidal
- Figura 17 - Seção trapezoidal de uma valeta de proteção de aterro
- Figura 18 - Seção retangular
- Figura 19 - Sarjeta triangular
- Figura 20 - Sarjeta trapezoidal
- Figura 21 - Sarjeta retangular
- Figura 22 - Sarjeta de aterro
- Figura 23 - Saída d'água de greide em rampa
- Figura 24 - Saída d'água de curva vertical côncava
- Figura 25 - Descida d'água
- Figura 26 - Esquema de um bueiro de greide completo em aterro
- Figura 27 - Esquema de um bueiro de greide completo em corte

Figura 28 - Leiras de proteção centrais

Figura 29 - Leiras de proteção laterais construídas em minério e estéril.

Figura 30 - Leiras de separação entre acessos de equipamentos pesados e leves.

Figura 31 - Leira trapezoidal com dimensões adequadas.

Figura 32 - Saída de emergência

Figura 33 - Superelevação

Figura 34 - Carregadeira sobre argila ferruginosa pouco competente

Figura 35 - Rejeito de jigagem

Figura 36 - Itabirito hidratado

Figura 37 - Saída nas laterais das vias direcionando a drenagem e aspecto construtivo da drenagem nas saídas laterais

Figura 38 - Sump para drenagem da água.

Figura 39 - Bermas para direcionamento de drenagem

Figura 40 - Caminhão pipa convencional

Figura 41 - Caminhão fora de estrada adaptado para uso como caminhão pipa.

Figura 42 - Aspersão fixa ao longo da extensão de uma estrada de acesso principal às minas



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Distância de frenagem adotada pela AASHTOO

Tabela 2 – Materiais usados como revestimento

Tabela 3 – Graduação de materiais de revestimento

Tabela 4 – Capacidade de suporte de vários materiais

Tabela 5 – Problemas gerados pelos elementos geométricos

## LISTA DE SIGLAS, ABREVEATURAS E SÍMBOLOS

g: Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

t: Tempo decorrido entre a reação do motorista e ação dos mecanismos de frenagem;

$\theta$ : Greide da rampa, positivo para baixo (em graus);

$U_{min}$ : Coeficiente de fricção do pneu;

$V_o$ : Velocidade do veículo ( $m/s$ )

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials;

S: Distância mínima de frenagem (m);

L: Comprimento da curva vertical (m);

A: Diferença algébrica de greides (%);

$h_1$ : Altura do operador em relação ao piso (m);

$h_2$ : Altura de um obstáculo (m);

NRM: Norma Reguladora de Mineração ;

$V_o$ : Velocidade do veículo ( $km/h$ );

e: Superelevação aplicada ( $m/m$  de largura de estrada);

$U_{min}$ : Coeficiente de fricção entre os pneus e a superfície da estrada;

R: Raio de curvatura de uma curva (m);

litro/ $m^2$ : Litro por metro quadrado;

km/h : Quilômetro por hora;

m/s: Metro por segundo;

TCP: Tratamento contra pó;

$CaCl_2$ : Cloreto de cálcio;

$MgCl_2$ : Cloreto de magnésio;

$mg/m^3$ : Miligrama por metro cúbico;

RCC: Concreto compactado a rolo;

Mpa: Mega Pascal;

DMT: Distância média de transporte ;

m: Metro;

$m/s^2$ : Metro por segundo ao quadrado;

cm: Centímetro;

km: Quilômetro;

ASTM: *American Society for Testing and Materials*;

CBR: *California Bearing Ratio* (= ISC).

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1

Introdução.....	12
1.1 Considerações iniciais .....	12
1.2 Justificativa.....	13
1.3.1 Objetivo geral.....	14
1.3.2 Objetivo específico.....	14

### CAPÍTULO 2

Revisão bibliográfica.....	15
2.1 Considerações iniciais .....	15
2.2 Estrada de mina .....	15
2.2.1 Projeto geométrico .....	16
2.2.1.1 Distância de frenagem .....	17
2.2.1.2 Distância de visibilidade .....	19
2.2.1.3 Largura .....	21
2.2.1.4 Superelevação.....	23
2.2.1.5 Raio de curvatura.....	24
2.2.1.6 Inclinação para direcionamento de drenagem .....	25
2.2.1.7 Greide .....	26
2.2.1.8 Interseções entre elementos geométricos .....	27
2.2.1.9 Leiras de segurança .....	28
2.2.1.10 Inclinação para direcionamento de drenagem .....	28
2.2.2 Projeto estrutural .....	29
2.2.3 Projeto de drenagem.....	31
2.2.4 Técnicas de tratamento contra pó.....	31
2.2.5 Construção.....	33
2.2.5.1 Materiais da camada de revestimento .....	33
2.2.5.2 Materiais para as camadas de base e sub-base .....	37
2.2.5.3 Requisitos para compactação .....	38

2.2.6 Manutenção das estradas.....	39
2.3 Sistemas de drenagem .....	47
2.3.1 Drenagem superficial.....	48
2.3.1.1 Valetas de proteção de corte .....	49
2.3.1.2 Valetas de proteção de aterro .....	50
2.3.1.3 Sarjetas de corte .....	51
2.3.1.4 Sarjetas de aterro .....	53
2.3.1.5 Saídas d'água .....	54
2.3.1.6 Descidas d'água .....	56
2.3.1.7 Caixas coletoras .....	57
2.3.1.8 Bueiros de greide .....	58
2.3.2 Drenos profundos.....	60
2.4 Estudo de caso .....	63
2.4.1 Dados básicos de projeto .....	63
2.4.2 Projeto geométrico.....	63
2.4.3 Projeto estrutural .....	67
2.4.4 Projeto funcional .....	67
2.4.5 Projeto de drenagem.....	69
2.4.6 Manutenção .....	71
2.4.7 Modelo de emissão de particulados.....	72
2.4.8 Métodos Construtivos.....	74

### **CAPÍTULO 3**

Análise dos resultados .....	76
3.1 Conclusão .....	76

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77
----------------------------------	----

# **CAPÍTULO 1**

## **Introdução**

### **1.1 Considerações iniciais**

As estradas têm uma grande importância para o sucesso da atividade mineradora. Elas viabilizam o transporte de minério e estéril, como também de equipamentos e pessoas em uma mina, e quando mal projetadas e em más condições, ocasionam problemas, como falta de segurança, ineficiência do transporte, aumento nos custos com manutenção em equipamentos, como também das próprias vias. Dessa forma, diminuem os lucros do setor.

Muitas estradas de mina em complexos mineradores de ferro são concebidas sem qualquer critério de dimensionamento. Além disso, são executadas de forma empírica, compreendendo basicamente etapas de aterro, espalhamento e compactação no teor de umidade natural do estéril de minério de ferro, principal material da superestrutura viária. No entanto, esses procedimentos não contemplam a compactação dos materiais em camadas, nem tampouco um controle tecnológico de campo. A “compactação” é obtida apenas superficialmente, por ocasião da passagem de veículos do tipo fora-de-estrada, durante operações convencionais de produção de mina. Aliados a dispositivos de drenagem inadequados e ineficientes, os resultados indesejáveis são diversos: enfraquecimento precoce da plataforma da estrada, perda de agregados, formação de buracos, trilhas e corrugações, geração excessiva de material particulado (na ausência de chuvas) ou lama (em períodos chuvosos). Tais problemas se agravam ainda mais quando da condução de técnicas equivocadas de manutenção, que compreendem processos rotineiros de raspagem de leito com motoniveladoras, impactando sensivelmente na redução de vida útil do pavimento. (Ferreira, 2007)

## 1.2 Justificativa

Nos dias atuais, o mercado vem se tornando cada vez mais competitivo e as empresas buscam reduzir o custo de produção e alcançar o lucro máximo, sem perder a qualidade do produto final. Nos orçamentos das empresas de mineração, os custos com a construção e manutenção de estradas possuem uma grande relevância.

A estrutura das estradas de mina está sujeita a deformações plásticas e trincas, causadas por ações das cargas de tráfego e os efeitos do intemperismo, como variação de temperatura e umidade. No Relatório de Inventário de Estradas de Acesso de Mina (Oliveira Filho *et al.*, 2010a) é relatado que os procedimentos atuais de projeto e construção não são satisfatórios e são fatores que devem ser modificados ou alterados. As consequências mais prementes dessa situação é o uso de técnicas de manutenção inadequadas que afetam a estrutura dos acessos, demandando necessidades de manutenção rotineiras e repetitivas que avolumam custos aos sistemas de acesso de mina.

A evidência disso é que os projetos geométrico, estrutural e de drenagem não são elaborados e nem dimensionados, fazendo com que a construção seja executada de forma empírica sem utilizar tecnologias de escolha e seleção de material, de projeto ou de compactação. Isto gera como resultado a adoção de uma manutenção inadequada, de uso intensivo de motoniveladora e caminhão espargidor de água, com retirada de material nobre e exposição de material de subleito com capacidade de suporte não condizente para a carga dos caminhões que trafegam nos acessos de mina. (Oliveira Filho *et al.*, 2010b)

Este trabalho, apresenta uma revisão bibliográfica, o qual expõe as principais características dos projetos para a construção de uma estrada mineira, enfatizando os problemas que podem gerar nas estruturas das vias e os problemas de manutenção.

### **1.3.1 Objetivo geral**

Apresentar os principais elementos para um projeto de construção de uma estrada mineira e seus impactos na mina quando não praticados.

### **1.3.2 Objetivo específico**

Para alcançar o objetivo principal proposto foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar os elementos de um projeto geométrico e os principais problemas gerados quando estes não são colocados em prática ou mal projetados;
- Apresentar o projeto estrutural de uma estrada mineira e seus impactos quando as camadas do pavimento são mal dimensionadas;
- Definir TCP - técnicas de tratamento contra pó;
- Apresentar os materiais para a construção dos pavimentos e o procedimento de compactação;
- Apresentar os principais defeitos das estradas mineiras e as práticas de manutenção;
- Apresentar os principais sistemas de drenagem em uma estrada;
- Apresentar um estudo de caso, como forma de demonstrar um projeto de estrada sendo colocado em prática.

## **CAPÍTULO 2**

### **Revisão bibliográfica**

#### **2.1 Considerações iniciais**

Percebe-se que há uma bibliografia muito limitada sobre o dimensionamento das estradas mineiras. Este trabalho foi baseado, principalmente em referências bibliográficas que foram frutos de um convênio entre a Vale e a UFOP, como por exemplo, o Manual de Estradas de Acesso de Mina (Oliveira Filho *et al.*, 2010b) e as dissertações de mestrado (Sousa, 2011; Reis, 2014).

É apresentado o projeto geométrico, enfatizando os seus principais elementos, o projeto estrutural, técnicas de tratamento contra pó, construção e manutenção das estradas mineiras e os principais sistemas de drenagem. Por fim, é apresentado um estudo de caso, retirado da tese de mestrado (Sousa, 2011), para demonstrar o que realmente é aplicado em uma mina de lavra a céu aberto.

#### **2.2 Estrada de mina**

Um elemento comum nas minas de céu aberto, que utilizam os caminhões como meio de transporte, é a construção de estradas. Elas estão ligadas diretamente a produção da mina e problemas com as mesmas e podem acarretar em impactos sobre a produtividade e/ou custos.

Alguns fatores devem ser analisados no projeto de construção de estradas de mina a céu aberto, como (Lima, 2013):

- Análise do custo mínimo para transporte de minério e estéril para fora da cava, ao longo da vida útil da mina;
- Mínimo de tráfego, máxima segurança e rápido acesso para as operações mineiras;
- Restrições à áreas de instabilidade de taludes;



- Vida útil longa da estrada. Isto implica na redução dos custos de construção, operação e demanda de material para construção.

Algumas considerações devem ser feitas:

- O local de saída das estradas na cava, que irá depender da localização da pilha de estéril e do britador primário;
- O número de acessos, sendo que mais de um permitirá maior flexibilidade de operação, porém a relação E/M pode aumentar;
- Se as estradas serão internas ou externas às paredes das cavas, semipermanentes ou temporárias, em zig-zag ou ao redor da cava;
- O número de linhas;
- O gradiente da estrada;
- A direção do tráfego.

Para definir o melhor traçado para a estrada, tem-se o projeto geométrico. Nesta fase identifica-se o tipo de veículo que tráfegará pela via e define-se a velocidade diretriz (Brasil, 1999). Outro fator que interfere no projeto geométrico, e que limitará o traçado da estrada de mina, é o local onde a mesma será implantada: se dentro da cava, na pilha de estéril ou fora da mina (Oliveira Filho *et al.*, 2010a).

### **2.2.1 Projeto geométrico**

Os elementos geométricos que compõe um projeto de estradas de mina devem estar alinhados com as questões relativas à segurança e à prática de uma engenharia bem aplicada. Tais elementos, quando corretamente projetados, geram benefícios baseados em aumento de segurança, performance otimizada a um custo mínimo por tonelada transportada e redução da utilização dos equipamentos de manutenção. Os elementos geométricos mais relevantes são descritos conforme se segue (Oliveira Filho *et al.*, 2010b):

- Distância de frenagem;
- Distância de visibilidade;
- Largura;
- Superelevação;

- Raio de curvatura;
- Transição para superelevação;
- Inclinação para direcionamento de drenagem;
- Gradiente;
- Interseções entre elementos geométricos;
- Leiras de segurança.

### 2.2.1.1 Distância de frenagem

Pode ser definida como sendo a mínima distância que um veículo consegue parar antes de atingir um obstáculo. Para isso, deve-se considerar que o veículo esteja em velocidade de projeto (é a velocidade máxima que um veículo consegue manter, em um trecho de estrada, em condições normais de segurança e conforto), de forma que consiga parar de modo seguro.

A distância de frenagem é especificada no manual dos equipamentos de transporte. Ela é calculada pela soma das duas parcelas abaixo, que se referem às distâncias percorridas pelo veículo durante (Oliveira Filho *et al.*, 2010b):

- tempo de reação (intervalo de tempo entre o instante em que o motorista avista um obstáculo em sua faixa de tráfego e o início da frenagem, incluindo o tempo de percepção);
- frenagem propriamente dita.

Para avaliar as distâncias de frenagem para diferentes graus e velocidades, Kaufman e Ault (1977) desenvolveram uma fórmula empírica com base nas limitações de distância de frenagem:

$$D = \frac{1}{2}gt^2 \operatorname{sen} \theta + Vot + \left| \frac{(gt \operatorname{sen} \theta + Vo)^2}{2g (U_{\min} - \operatorname{sen} \theta)} \right|$$

Onde:

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

$t$  = tempo decorrido entre a reação do motorista e ação dos mecanismos de frenagem

$\theta$  = greide da rampa, positivo para baixo (em graus)

$U_{\min}$  = coeficiente de fricção do pneu (em geral considerado 0,3)

$V_o$  = velocidade do veículo (m/s)

Como citado no Manual de Estradas de Acesso de Mina (Oliveira Filho *et al.*, 2010b), a AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) desenvolveu muitos estudos laboratoriais e testes em estradas para calcular valores adequados para a determinação de distâncias de frenagem que garantam a segurança dos operadores e dos veículos de transporte. A tabela 1 apresenta valores de distâncias de frenagem válida em condições extremas, tanto para pavimentos molhados em boas condições, quanto para pavimentos secos muito deteriorados.

- Velocidade média de percurso: é a média entre as velocidades de o tráfego ou de parte do mesmo e é encontrada através da divisão da somatória das distâncias percorridas pelo somatório dos tempos de percurso.
- O tempo de reação da tabela 1 é considerado constante para qualquer velocidade.
- Coeficiente de atrito longitudinal pneu x pavimento ( $f$ ): decresce em relação ao aumento de velocidade. É influenciado por diversos fatores, como: tipo de material, desenho dos sulcos e pressão dos pneus, tipo e condição da superfície do pavimento e presença de água, principalmente.

Tabela 1 – Distância de frenagem adotada pela AASHTOO

Velocidade de projeto (km/h)	Velocidade média de percurso (km/h)	Tempo de reação (s)	Coeficiente de atrito ( $f$ )	Distância de frenagem (m)	
				Desejável	Mínima
30	30	2,5	0,40	29,8	29,8
40	40	2,5	0,38	44,4	44,4
50	47	2,5	0,35	62,9	57,5
60	55	2,5	0,33	84,5	74,3
70	63	2,5	0,31	110,6	94,0
80	70	2,5	0,30	139,2	112,7
90	77	2,5	0,30	168,3	131,0
100	85	2,5	0,29	204,5	156,7
110	91	2,5	0,28	245,5	179,0
120	98	2,5	0,28	284,6	202,4

### **2.2.1.2 Distância de visibilidade**

É a distância mínima necessária para que um veículo que percorre a estrada, na velocidade de projeto, possa parar com segurança, antes de atingir um obstáculo em sua trajetória (Almeida, 2014). Pelo menos 150 metros são requeridos, baseado nos requisitos da distância de visibilidade de frenagem. Quanto menor a distância de visibilidade, menor a velocidade na qual o caminhão deve trafegar (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

A figura 1 demonstra algumas configurações geométricas que indicam diferentes níveis de segurança. Nas imagens 1 e 3 estão representadas condições inseguras, pois a distância de visibilidade é menor que a distância de frenagem. Uma solução para este tipo de problema é aumentar a distância de visibilidade, e se caso, não for possível, é necessário aplicar limites rigorosos de velocidade. Nas imagens 2 e 4, estão representadas situações seguras, uma vez que, a distância de visibilidade é maior que a de frenagem.

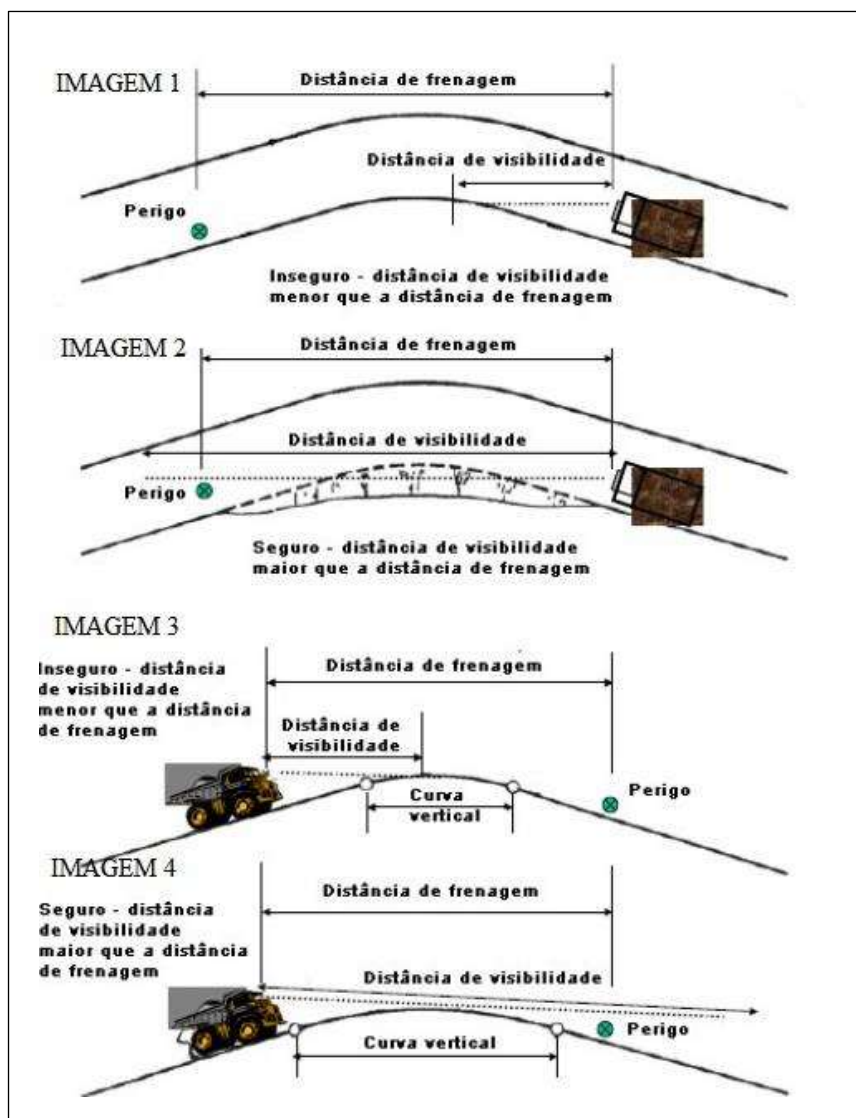


Figura 1 - Configurações geométricas indicando diferentes condições de segurança (Mod. Visser, 2008)

As curvas verticais são usadas para fornecer uma transição suave entre um greide da estrada para outro. Os comprimentos das curvas verticais devem ser adequados para dirigir confortavelmente e fornecer amplas distâncias de visibilidade. Monenco (1989) recomenda as seguintes expressões para calcular os comprimentos de curva: (Mod. Tannant e Regensburg, 2001)

$$L = \frac{2S - 200 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A}, \text{ para } S > L.$$

$$L = \frac{AS^2}{100(\sqrt{2h_1} + \sqrt{2h_2})^2}, \text{ para } S < L.$$

Onde:

L: comprimento da curva vertical (m);

S: distância mínima de frenagem (m);

A: diferença algébrica de greides (%);

$h_1$ : altura do operador em relação ao piso (m);

$h_2$ : altura de um obstáculo (m) (usualmente 0,15 m para representar uma figura parada na pista)

Em geral, são desejáveis curvas com comprimentos maiores que os calculados, uma vez que proporcionam distâncias de visibilidade maiores. Entretanto, comprimentos excessivos podem resultar em longos trechos, relativamente planos, que podem levar a buracos, a menos que a drenagem seja adequada. Em qualquer caso, deve-se evitar o comprimento da curva vertical menor que 30 metros (Mod. Tannant e Regensburg, 2001).

### **2.2.1.3 Largura**

A largura das vias de circulação, em trechos curvos ou retos, deve ser suficiente para permitir a manobra segura do veículo e manter a continuidade da estrada. Como, o tamanho dos equipamentos varia de mina para mina, ao invés do tipo ou peso bruto do veículo, a largura da estrada é definida pelo tamanho do veículo. (Mod. Tannant e Regensburg, 2001).

Segundo a Norma Reguladora de Mineração – NRM, a largura mínima das vias de trânsito deve ser duas vezes maior que a largura do maior veículo utilizado, no caso de pista simples, e três vezes, para pistas duplas. Se, o plano de lavra e a natureza das atividades realizadas não permitirem seguir estas regras, deve-se adotar procedimentos e sinalizações adicionais para garantir o tráfego com segurança. A figura 2 ilustra as situações citadas.



Figura 2 - Exemplo de perfil esquemático de largura de estrada para caminhão fora de estrada Caterpillar (Mod. Visser, 2008)

As estradas muito estreitas podem diminuir a vida útil dos pneus, uma vez que forçam o operador a transitar nas leiras enquanto passa outro veículo. Isso resulta em desgastes laterais, cortes e problemas de nivelamento nos pneus. Este tipo de problema ocorre, geralmente, quando são adicionados novos caminhões maiores em uma frota já existente, mas não adaptam as pistas que eram para equipamentos menores.

Em estradas com volume de tráfego intenso e/ou visibilidade limitada, sugere-se a construção de estradas 4 vezes mais largas do que a largura do maior equipamento (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

Quando há elementos como canaletas de drenagem e leiras, as estradas devem ser largas o suficiente para acomodá-los, como mostra a figura 3:

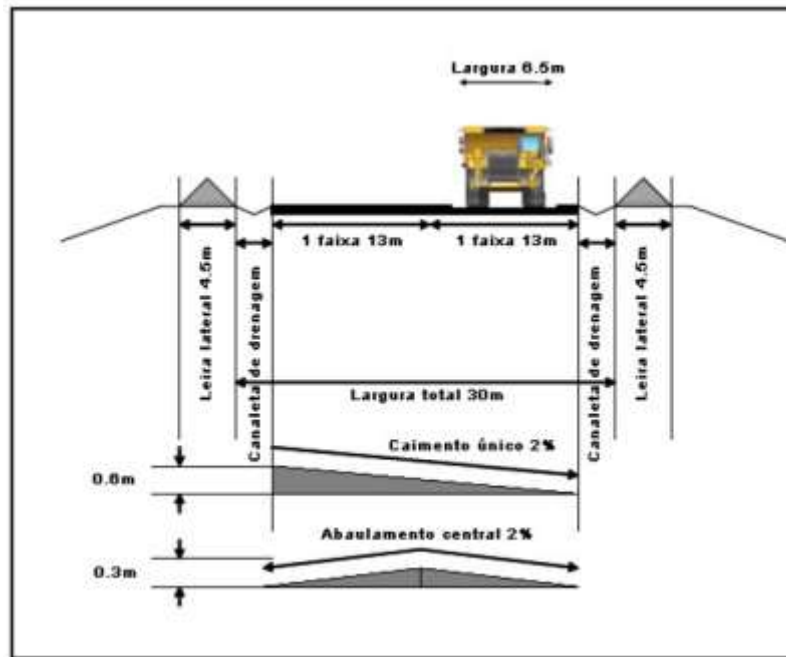


Figura 3 – Perfil esquemático de largura de estradas com elementos geométricos (Mod.Visser, 2008)

#### 2.2.1.4 Superelevação

A superelevação, também chamada sobrelevação, é definida como a inclinação transversal da pista, feita com o objetivo de criar uma componente do peso do veículo na direção do centro da curva que, somada à força de atrito, produzirá a força centrípeta (figura 4). A superelevação assegura ao tráfego condições de maior segurança e conforto no tráfego. As curvas geram esforços laterais nos pneus, podendo causar desgastes. A superelevação das curvas ajuda a minimizar essas forças, reduzindo os danos (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).





Figura 4 - Representação esquemática da superelevação (Oliveira Filho *et al.*, 2010b)

O valor da superelevação a ser adotado para uma determinada curva circular deve ser limitado a um valor máximo por questões de segurança. Os valores máximos para a superelevação adotados em projetos devem levar em consideração as condições climáticas (frequência de chuvas), condições topográficas do local e velocidade média do tráfego. Em estradas de mina os valores de superelevação não devem ultrapassar 5% a 7%. A determinação da superelevação depende do raio de curvatura e da velocidade do caminhão.

#### 2.2.1.5 Raio de curvatura

As curvas devem ser projetadas com o máximo raio possível, mantendo-se suavidade (curvas pouco pronunciadas, sempre que possível), o que permite maior segurança e redução de congestão de tráfego. Nos casos de curvas compostas (curvas em transição) devem-se evitar mudanças abruptas no raio de curvatura. A projeção de curvas deve levar em consideração a performance dos caminhões. Curvas projetadas de tal forma a permitir velocidade constante, sem redução de marchas ao longo do trajeto, levam a máxima performance dos caminhões, não provocando o aumento do tempo de ciclo, o que influencia diretamente os custos de transporte. A equação a seguir determina o raio

de curvatura R (m) mínimo. A equação considera a superelevação aplicada, o coeficiente de fricção e a velocidade do veículo (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

$$R = \frac{v_o^2}{127 (e + U_{\min})}$$

Onde:

$V_o$ = velocidade do veículo (km/h);

$e$  = superelevação aplicada (m/m de largura de estrada);

$U_{\min}$ = coeficiente de fricção entre os pneus e a superfície da estrada, normalmente considerado 0,3 (adimensional).

Como referência, um raio de curvatura mínimo de 250 metros com superelevação é ideal para trânsito de veículo em velocidade mais alta.

Em estradas de pistas simples, curvas fechadas devem ser projetadas com 4 a 4,5 vezes a largura do maior equipamento para acomodar 120% do diâmetro mínimo interno da curva (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

#### **2.2.1.6 Inclinação para direcionamento de drenagem**

O correto direcionamento da drenagem faz com que águas não sejam acumuladas nas estradas. Criar um caimento central da pista para ambas as extremidades ou propiciar uma inclinação na pista a partir do canto para a extremidade ou vice-versa, são opções básicas para uma drenagem eficiente. Em qualquer situação, é importante construir canaletas nos pontos extremos do direcionamento da água conforme ilustra a figura 5.

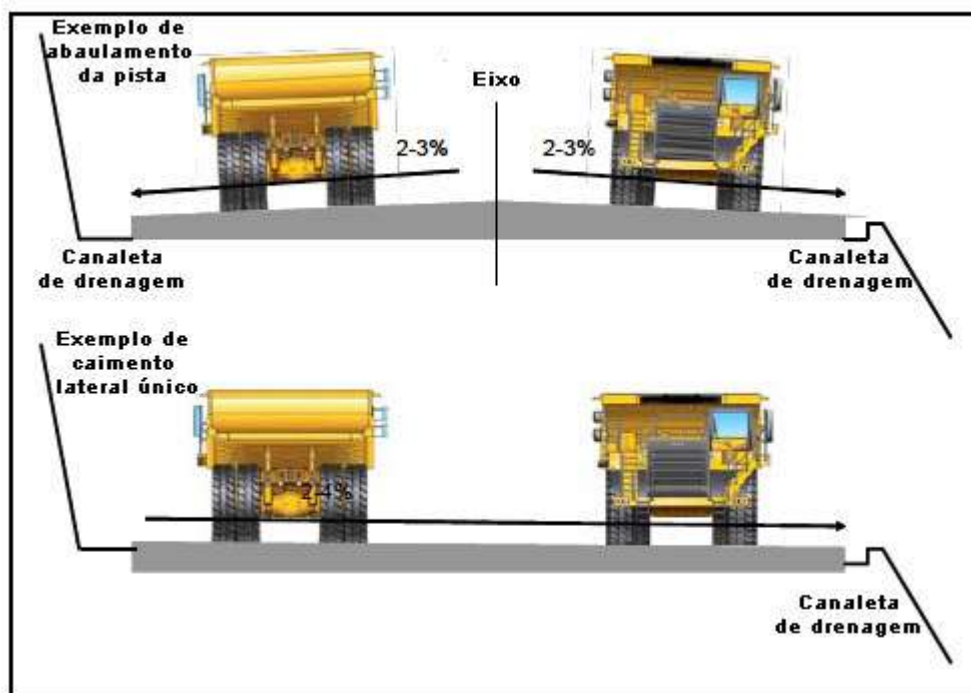


Figura 5 - Formas de direcionamento da drenagem (Mod. Visser, 2008)

Em estradas bem construídas com cascalho ou rochas britadas, uma inclinação de aproximadamente 2% é ideal, em casos nos quais a geometria da cava permita. Considerações especiais devem ser feitas na determinação das inclinações máxima e mínima. Inclinações menores são aplicáveis a superfícies de estradas compactadas que podem rapidamente dissipar a água sem que esta seja percolada para o interior da pista. Em situações nas quais a pista é relativamente irregular, inclinações maiores são indicadas. Neste caso há rápido escoamento da água e redução da ocorrência de poças e camadas saturadas na fundação, que podem enfraquecer a estabilidade das pistas (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

### 2.2.1.7 Gradiente

Segundo o Manual de Estradas de Acesso de Mina (Oliveira Filho *et al.*, 2010b) o gradiente de uma rampa, também chamado de inclinação, é definido como a inclinação longitudinal em relação à horizontal, geralmente expressa em porcentagem. O gradiente deve ser o mais regular e constante possível, evitando-se que mude em intervalos curtos,

como mostra a figura 6. Gradientes irregulares provocam altos esforços no câmbio de transmissão e diminuição da velocidade de transporte.

A definição do gradiente ideal requer a análise das características topográficas e geometria da estrada, assim como a performance do caminhão. Deve-se também considerar as distâncias de frenagem. Gradientes pronunciados exigem a redução de velocidade dos caminhões nas descidas para garantir distâncias de frenagem seguras e frequente redução de marcha também nas subidas, provocando perda de velocidade. Tais mudanças de velocidade resultam em perda de produtividade, consumo adicional de combustível, aumento de desgaste mecânico e de custos de manutenção. É muito comum a adoção de gradientes que variam entre 8 e 10%, mas devem-se observar as especificações dos manuais dos equipamentos de transporte.

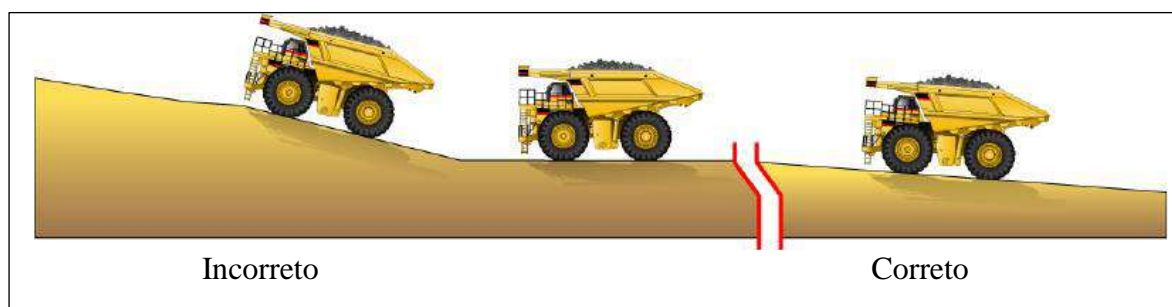


Figura 6 – Demonstração de gradientes (Holman, 2006)

### 2.2.1.8 Interseções entre elementos geométricos

Este item refere-se a conformações geométricas dos trechos de interseção entre inclinações centrais e laterais de drenagem, assim como em transições para trechos com superelevação. Deve-se projetar tais transições de forma o mais suave possível, garantindo o direcionamento da drenagem em cada interseção para que a água não seja empossada na estrada. Quando possível, deve-se considerar trechos horizontais entre os pontos de interseção. A figura 7 mostra a conformação entre trechos de transição (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

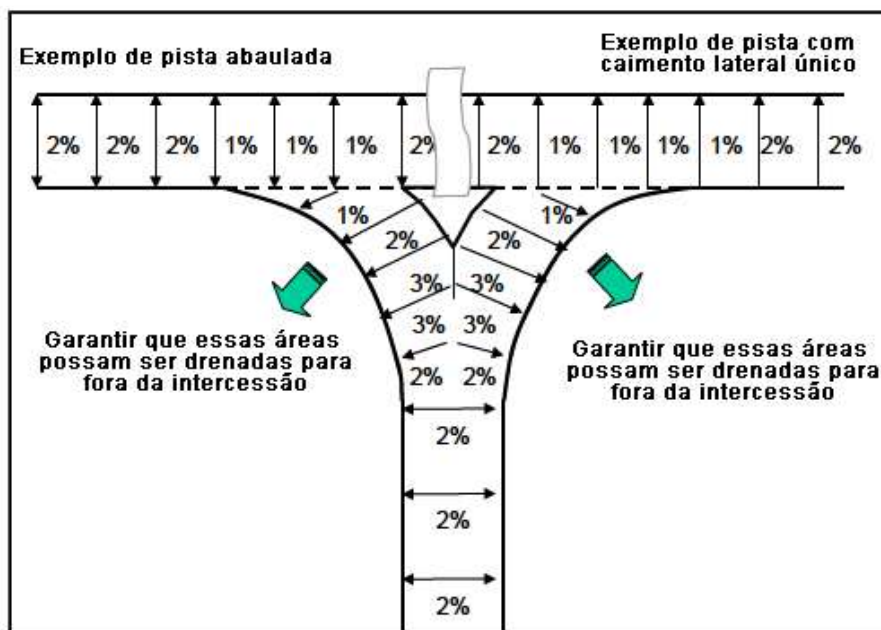


Figura 7- Exemplo de conformação entre trechos com diferentes inclinações para direcionamento de drenagem (Mod. Visser, 2008).

### 2.2.1.9 Leiras de segurança

Segundo as Normas Reguladoras de Mineração – NRM, as leiras devem ser construídas nas laterais das bancadas, vias de acessos ou estradas onde houver riscos de quedas de veículos e devem possuir altura mínima correspondente à metade do diâmetro do maior pneu de veículo que trafega pela via.

Já as leiras centrais auxiliam no controle de caminhões desgovernados. Neste caso, o caimento para escoamento da drenagem deve ser do centro para as bordas. O comprimento da leira deve ser, no mínimo, de 50 metros e quando necessário podem haver espaçamentos.

### 2.2.1.10 Inclinação para direcionamento de drenagem

Para que a água não seja acumulada nas estradas é necessário um correto direcionamento da drenagem. É necessário construir canaletas nos pontos extremos do direcionamento da água, tanto quando se constrói um caimento central da pista para

ambas as extremidades ou uma inclinação na pista a partir do canto para a extremidade, ou ao contrário.

Segundo o Manual de Estradas de Acesso de Mina (Oliveira Filho *et al.*, 2010b), uma inclinação de 2% é ideal para estradas construídas com cascalho ou rochas britadas. Em estradas compactadas que podem dissipar a água rapidamente, pode-se aplicar inclinações menores. Já em pistas irregulares, é desejável inclinações maiores, uma vez que, há rápido escoamento da água e redução da ocorrência de poças e camadas saturadas na fundação, que podem provocar o enfraquecimento da pista.

### 2.2.2 Projeto estrutural

O dimensionamento de um pavimento, foco principal do projeto estrutural, consiste na definição das espessuras das camadas que o compõe. Essas camadas devem ter capacidade de suporte tal que resistam à ruptura e não apresentem deformações ou desgastes excessivos, quando submetidas a esforços de carga devidos ao tráfego dos equipamentos. Essa configuração minimiza, na medida do possível, a necessidade de manutenções excessivas (Hugo, 2005).

O pavimento de acesso de mina é constituído por quatro camadas: revestimento, base, sub-base e reforço de subleito, que são construídas acima do subleito *in situ*.

Sousa (2011) cita em seu trabalho que quando se tem um subleito competente (constituído por materiais *in situ* resistentes) as estradas de mina são compostas apenas pela camada de revestimento, sendo este método também utilizado quando as estradas possuem vida útil de curta duração. Caso contrário, se projeta duas ou três camadas, constituídas por revestimento, base e/ou sub-base.

**Revestimento:** única camada com caráter funcional. Ela promove tração, resistência à abrasão e cisalhamento, transmite o carregamento do pneu para a base e sela a base contra a penetração de água superficial.

O revestimento ideal para a construção de uma estrada de mina deve promover os seguintes aspectos:

- Adequada trafegabilidade em condições climáticas variadas;
- Resistência à ação abrasiva do tráfego;
- Diminuição de poeira excessiva no período seco;
- Diminuição de piso escorregadio no período chuvoso;
- Baixo custo e redução da necessidade de manutenção.

**Base:** é uma camada de alta densidade e estabilidade. A sua função principal é distribuir as tensões criadas pelos pneus atuando na camada de revestimento, de tal forma que essas tensões não resultem em excessiva deformação da sub-base. Ela também protege a sub-base de mudanças de volume, expansão ou desagregação. Uma base estável é um dos fundamentos mais importantes no projeto de estradas. A projeção de um acesso sobre um material que não suporta adequadamente o peso do tráfego comprometerá severamente a mobilidade e controle do veículo, assim como deterioração geral do acesso.

**Sub-base:** é a camada intermediária em o subleito e a base, pode ou não existir. Ela é geralmente projetada em subleitos de solos extremamente incompetentes. Em geral é constituída por material granular. A sub-base promove drenagem e protege o subleito de contrações e expansões, aumenta o suporte estrutural e distribui o carregamento.

**Subleito:** é a camada de fundação. Essa estrutura deve suportar todos os carregamentos aplicados nas camadas superiores. Essa camada pode ser constituída pelo próprio terreno natural (material *in situ*) ou por rocha ou solo compactados.

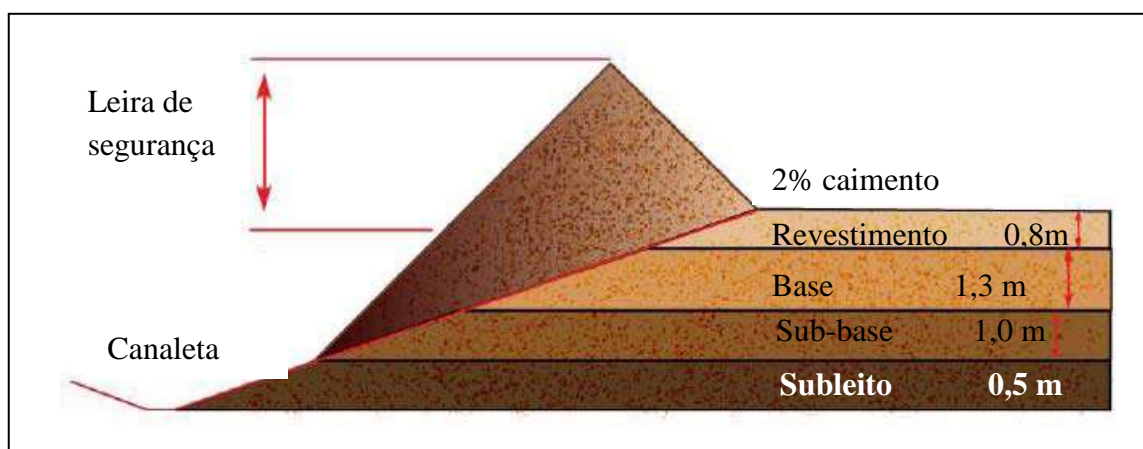


Figura 8 - Seção transversal de estradas (Mod. Holman, 2006)

### **2.2.3 Projeto de drenagem**

A elaboração e execução de um projeto de drenagem são vitais em estradas de mina, pois um dos principais fatores que provocam a degradação de estradas não pavimentadas é a erosão provocada pelo escoamento superficial e o acúmulo de água em seu leito e margens. A água pode ser originada de escoamento superficial, gerada na própria estrada ou proveniente de áreas marginais (Oliveira *et al.*, 2009, Griebeler *et al.*, 2005 e Griebeler, 2002).

Sem uma eficiente drenagem, por melhores que sejam as condições técnicas da pista, mais cedo ou mais tarde sua deterioração será total ou muito exigirá em termos de reparação e manutenção. Em sua função primordial, a drenagem de uma estrada deve eliminar a água que, sob qualquer forma, atinge o seu pavimento, captando-a e conduzindo-a para locais em que menos afete a segurança e durabilidade da via (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

### **2.2.4 Técnicas de tratamento contra pó**

De uma maneira geral, o tratamento contra pó (TCP) consiste no espargimento de material betuminoso e aplicação de areia grossa ou pedrisco, seguida de compactação com rolo liso e/ou pneumático, obtendo-se uma camada impermeável de ligante betuminoso e agregado sobre uma base previamente tratada. O ligante deve penetrar, no mínimo, de 2 a 5 mm na superfície da base, o que é possível utilizando-se, para tal, asfalto diluído.

Outros métodos de tratamento têm utilizado produtos químicos em adição ao solo da camada de tráfego, como os lino-sulfatos, cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) e cloreto de magnésio ( $\text{MgCl}_2$ ). No entanto, estes métodos mostram viabilidade financeira de aplicação para um elevado volume médio diário de veículos (Baesso e Gonçalves, 2003).

Em estradas de complexos mineradores, a formação de pó na superfície de rolamento das estradas se deve, principalmente, à abrasão sofrida pelos agregados de baixa dureza e à perda da fração fina das partículas da base, camada constituída majoritariamente de



materiais arenosos. Posto isso, a premissa de um TCP em estradas do tipo é conferir ao pavimento maior coesão e impermeabilidade. Desta forma, os resultados poderão ser amplos: mais que a redução da poeira em ocasiões de clima seco, poderá se reduzir também a formação de lama em períodos chuvosos, contribuindo para a trafegabilidade do trecho e diminuindo sensivelmente o número de intervenções.

Ocorre que a prática corriqueira de mitigação da poeira gerada consiste, na maioria das mineradoras, da aspersão contínua de água sobre as vias, por meio de caminhões-pipas. Demanda, para tanto, a necessidade de vários desses veículos em trânsito simultaneamente, além de pontos estratégicos de coleta d'água nos domínios da mina. Tal medida tem se mostrado necessária mas, em contrapartida, pouco eficiente, haja vista a rápida percolação de água para o interior do pavimento, que drena com facilidade pelas características arenosas que geralmente possui. Mais além, o próprio tráfego de veículos, aliado à insolação, são elementos contribuintes à rápida secagem do pavimento, conforme ilustra a figura 9.



Figura 9 - Precárias condições de tráfego impostas a uma estrada de mina, devido à excessiva geração de pó (Oliveira Filho *et al.*, 2010b)

Thompson e Visser (1999) mediram diferentes defeitos ocorrentes em uma particular estrada de mina e, atribuindo limites desejáveis, indesejáveis e inaceitáveis aos aspectos verificados, relacionaram a geração de material particulado com o tempo necessário para se atingir tais limites com o tráfego de veículos (Figura 10). Sendo assim, configurando um valor crítico como sendo o limite entre as situações “indesejável” e “inaceitável”, observaram que a aspersão d'água na estrada mostrava-se necessária a

cada 70 minutos. Para tanto, consideraram a taxa de aspersão em 0,5 litro/m<sup>2</sup>, a velocidade do vento em 1,7 m/s (6,2 km/h) e um único veículo padrão, trafegando à velocidade constante de 40 km/h.

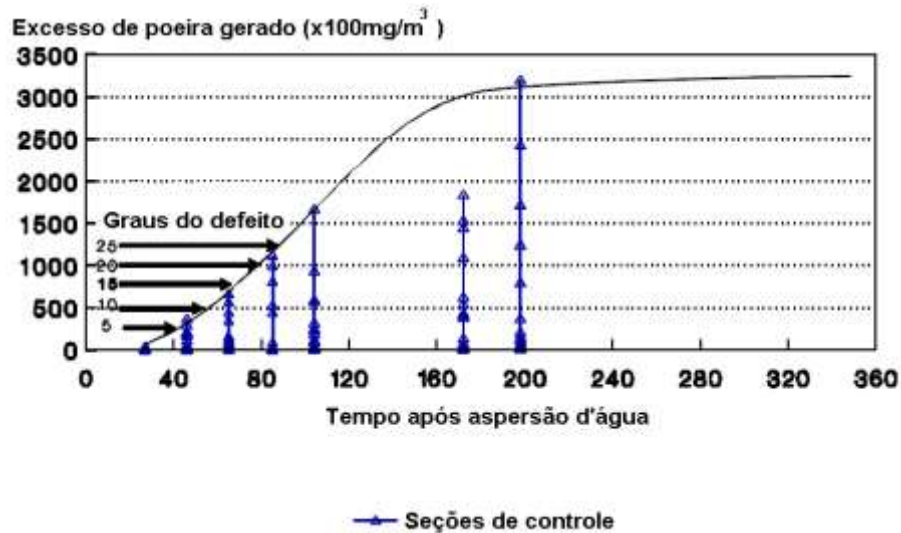


Figura 10 - Variação da geração de material particulado em uma estrada de mina (x100 mg/m<sup>3</sup>), após aspersão de água (Mod. Thompson e Visser, 1999)

## 2.2.4 Construção

A seleção de materiais adequados é muito importante para a construção de estradas. Ela se baseia nas propriedades do material, como: distribuição granulométrica, resistência à compressão, alterabilidade e rigidez. Em algumas situações o material pode ser britado para se adequar a uma determinada granulometria. A camada de revestimento exige o melhor material disponível, pois ela enfrenta grandes desgastes e grandes cargas dinâmicas devido ao tráfego de caminhões. (Mod. Tannant e Regensburg, 2001)

### 2.2.5.1 Materiais da camada de revestimento

O projeto da camada de revestimento é um pouco diferente que o das outras camadas, pois além de cumprir os requisitos gerais, deve-se levar em conta requisitos

operacionais, tais como controle de poeira, suavidade do tráfego, aderência e resistência ao rolamento.

Solos pedregulhosos e pedra britada são largamente utilizados na construção de estradas de mina, principalmente como materiais de base e revestimento. Esses materiais exibem baixa resistência ao rolamento e elevada aderência, e tem baixo custo de manutenção (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

Podem ser utilizados os seguintes materiais para a construção do revestimento das estradas (Mod. Tannant e Regensburg, 2001):

- Solos pedregulhosos;
- Pedra britada;
- Concreto asfáltico;
- Concreto compactado a rolo (RCC);
- Solo estabilizado.

Estradas de terra, a menos que completamente compactadas e estabilizadas, podem causar problemas para os veículos como também de manutenção das mesmas. Problemas de poeira são frequentes durante a estação de seca e, se não for controlada, a poeira pode contaminar os componentes de filtragem de ar, freios e outras peças, sendo necessárias frequentes substituições. Além disso, o pó pode representar um grande risco para o operador do veículo, uma vez que pode se tornar muito denso reduzindo a visibilidade. Para solucionar o problema de poeira é necessário um umedecimento contínuo da superfície, sendo mais um gasto com manutenção. As vantagens e desvantagens de cada material são mostradas na tabela abaixo:

Tabela 2– Materiais usados como revestimento (Mod. Monenco, 1989)

<b>Material</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<i>Solos pedregulhosos e rocha britada</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superfície estável, relativamente lisa.</li> <li>• Custo de construção relativamente baixo.</li> <li>• Baixa deformação sob carregamento.</li> <li>• Facilidade de construção.</li> <li>• Baixa resistência ao rolamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de manutenção frequente.</li> <li>• Pode ser necessária a britagem e peneiramento do material.</li> <li>• Poeira no período seco.</li> <li>• Erodível se inundado.</li> </ul>
<i>Concreto asfáltico</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto coeficiente de adesão.</li> <li>• Não gera pó.</li> <li>• Superfície estável e lisa.</li> <li>• Baixa resistência ao rolamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exige camada de base com CBR maior do que 80.</li> <li>• Construção especializada e de alto</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo de manutenção.</li> <li>• Possíveis velocidades elevadas.</li> <li>• Baixa deformação sob carregamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• custo.</li> <li>• Impraticável para equipamentos de esteira.</li> </ul>
<i>Concreto compactado</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto coeficiente de adesão.</li> <li>• Resistência ao rolamento muito baixa.</li> <li>• Não há geração de pó.</li> <li>• Superfície lisa e estável.</li> <li>• Baixo custo de manutenção.</li> <li>• Baixa deformação sob carregamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custos de construção elevados.</li> </ul>
<i>Solo estabilizado</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite sub-base menos espessa.</li> <li>• Estabiliza subleito fraco.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não é apropriado como camada superficial.</li> </ul>

### *Solos cascalhosos naturais e pedra britada*

Esses materiais são frequentemente usados porque normalmente são encontrados na própria mina ou no seu entorno, podendo ser usados a baixo custo e com rapidez de obtenção. Quando construídos e mantidos adequadamente, ambos os materiais propiciam estradas estáveis que resistem à deformação e permitem boa tração com baixa resistência ao rolamento. A espessura necessária da camada pode ser obtida pelas curvas CBR. Uma graduação satisfatória para os materiais granulares usados como revestimento é listada na tabela 3.

Tabela 3 – Graduação de materiais de revestimento (Oliveira Filho *et al.*, 2010b)

<b>Tamanho peneira ASTM</b>	<b>% passante</b>
76mm (3")	100
38mm (1.5")	70-100
25mm (1")	55-88
9.5mm (3/8")	40-70
#4	30-55
#10	22-42
#200	5-10

As estradas sujeitas a clima quente e seco devem conter pelo menos 5% de finos para minimizar os problemas de poeira e geração de material inconsolidado, quando secas. No entanto estradas sujeitas a prolongadas chuvas não devem possuir mais de 10 % de finos que venham a formar lama ou resultem em superfícies escorregadias. O material não deve conter matéria orgânica, raízes, ou outros materiais inadequados. Partículas maiores do que 9,5 mm devem ter no mínimo 30% de faces fraturadas. A disposição do material deve ser em camadas que não excedam 200 mm de espessura antes da compactação. Cada camada deve ter graduação e teor de umidade uniforme e deve ser espalhada sem causar segregação de partículas. Outros materiais têm se mostrado

aplicáveis ao uso como revestimento, tais como escória, cinza vulcânica, rejeitos de processamento mineral e granito alterado (Oliveira Filho et al., 2010b).

### *Concreto asfáltico*

Assim como o concreto compactado a rolo, o concreto asfáltico confere à estrada alto coeficiente de adesão e cria uma superfície que minimiza os problemas de geração de pó. Além disso, as características de estabilidade desse material criam uma superfície de transporte lisa que não propicia a geração de borrachudos ou outros defeitos que dificultam a trafegabilidade (Mod. Tannant e Regensburg, 2001). Sendo um material processado, o concreto asfáltico deve ser preparado e aplicado conforme a especificação, sobre camadas de base e subbase bem compactadas. É recomendado que a camada de base consista em pedra britada com CBR igual ou superior a 90%. A camada de concreto asfáltico deve ter espessura mínima de 100 mm (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

### *Concreto compactado a rolo*

Consiste em um concreto pré-misturado que é despejado no leito da estrada e espalhado, de forma que fique com uma espessura uniforme, não ultrapassando 0,3 m, utilizando-se motoniveladora e rolo compactador vibratório. A relação água/cimento deve ser ajustada para produzir uma mistura rígida com resistência a compressão uniaxial em 28 dias de 15 Mpa a 30 Mpa. (Mod. Tannant e Regensburg, 2001)

A distribuição das camadas deve ser realizada em camadas finas para permitir a completa compactação por rolo vibratório compactador. O material resultante é duro e produz uma superfície durável com baixa resistência ao rolamento e altas características de tração. Antes de sua colocação, deve-se estabelecer uma camada de sub-base compactada suficientemente espessa, seguida por uma camada adicional de material de base compactado para formar a fundação (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

### 2.2.5.2 Materiais para as camadas de base e sub-base

As camadas de base e sub-base são geralmente construídas a partir de materiais disponíveis no local, porém podem ocorrer em uma quantidade insuficiente para formar a espessura desejável e/ou o uso desses materiais se torna inadequado devido a fatores como longas distâncias, dificuldade de acesso, limitações em profundidade ou restrições ambientais (Mod. Tannant e Regensburg, 2001).

Em geral a camada de base é constituída por material mais grosso e a sub-base de material arenoso ou siltooso. Usualmente esses materiais não são britados, o que dificulta a obtenção de uma determinada distribuição granulométrica. Por isso deve-se fazer inspeção visual ou mesmo peneiramento, se necessário, para que o tamanho de partícula máximo seja limitado a 2/3 da espessura da camada (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

Denomina-se capacidade de suporte a habilidade de um dado subleito de suportar os carregamentos de veículo que transitam na superfície. A tabela 4 apresenta os valores típicos para cada material. No entanto, a capacidade de suporte do solo é um procedimento que deve ser determinado por um geotécnico qualificado (Mod. Tannant e Regensburg, 2001).

Tabela 4– Capacidade de suporte de vários materiais (Tannant e Regensburg, 2001)

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

### 2.2.5.3 Requisitos para compactação

Uma boa compactação das camadas que compõe a estrada contribui para o aumento da rigidez e resistência do material. Se o material não é bem compactado no estágio de construção, o tráfego subsequente dos equipamentos de transporte completará a compactação. No entanto, ela será feita de forma aleatória, provocando a deformação da superfície e possível enfraquecimento estrutural. Uma compactação mal feita nas camadas inferiores não pode ser corrigida pela aplicação do esforço de compactação extra na camada já construída e nem por atividades posteriores de manutenção.

Uma vez que a cobertura total necessária do subleito tenha sido estabelecida pelo dimensionamento do pavimento de acordo com as suas condições de suporte, assim como a espessura das diversas camadas que compõe essa estrutura, atenção deve ser dada à colocação desses materiais. Kaufman e Ault (1977) estabelecem que independentemente do material utilizado, a sub-base, a base e o revestimento devem ser compactadas em camadas não excedendo 0,20 m de espessura.

De forma a garantir a estabilidade das camadas, o material a ser compactado deve exceder a largura desejada na superfície em pelo menos 0,6 metros e deve ser sempre compactado enquanto úmido. O equipamento de compactação ideal é um rolo compactador pesado (15 t), vibratório liso para materiais pouco coesivos e um rolo tipo pé de carneiro para solos coesivos. Para a compactação de cada 0,2 m de camada são necessárias repetidas passadas até que o material não seja mais comprimido sob o peso do rolo (até 6 passadas, usualmente).

O procedimento de compactação ideal das camadas da estrada deve seguir as recomendações:

- Ao final da abertura da estrada, deve-se trafegar com um caminhão carregado para verificar a existência de áreas com material mole ou pouco resistente. Esses trechos devem ser escavados até atingirem uma camada competente e preenchidos novamente com o material adequado, disposto em camadas de 0,2 m, sendo em seguida compactados para 95% da densidade seca máxima Proctor normal.

- Após a execução do procedimento acima, a camada superior de 0,15 m do subleito deve ser escarificada e recompactada para 95% do Proctor normal usando rolo pé de carneiro ou vibratório.
- A camada de sub-base deve tipicamente consistir de um material granulado disposto em espessura de 0,2 metros compactado a 95% da densidade seca máxima Proctor normal, passando aproximadamente seis vezes com o rolo vibratório.
- A base consiste em material cascalhoso bem graduado disposto em camadas de 0,15 m e compactado a 98% da densidade seca máxima Proctor normal, usando-se um rolo vibratório liso.
- A camada de revestimento consiste de 0,3 metros a 0,5 metros de espessura de pedra britada bem graduada disposta em camadas de 0,15 m de espessura e compactada a 98% ou 100% da densidade seca máxima Proctor normal, usando-se um rolo vibratório liso.
- Durante a construção, deve-se monitorar continuamente a compactação e o teor de umidade. A cada material usado na construção da estrada há um teor de umidade ótimo associado, conferindo a máxima densidade e resultando em materiais com as melhores propriedades. É por isso que os materiais devem ser compactados o mais próximo possível da umidade ótima.
- A superfície acabada da estrada deve ter um caimento lateral de 2 a 3% para o direcionamento da drenagem e no caso de aterros, devem ser garantidos taludes com inclinações típicas como 3H:1V. Outras providências com leiras e canaletas laterais completam a construção.

### **2.2.6 Manutenção das estradas**

A manutenção de estradas tem como objetivos conservar a superfície de rolamento razoavelmente isenta de irregularidades, firme e livre de perda excessiva de material solto, além de manter a declividade transversal do leito da estrada apropriada para assegurar o escoamento superficial das águas. É constituída por um conjunto de atividades que são executadas para minimizar os defeitos e, conseqüentemente, reduzir os custos operacionais dos caminhões, assim como para prolongar a vida útil das estradas (Sousa, 2011).



A maior parte dos procedimentos de manutenção empregados em estradas de mina tem caráter corretivo. Kaufman e Ault (1977) enfatizam que deveriam ser feitos esforços para a incorporação de procedimentos preventivos de manutenção em detrimento de procedimentos corretivos. Dentre os procedimentos de manutenção preventiva esses autores chamam atenção para os seguintes (Reis, 2014):

- Buscar a eficiência do sistema de drenagem de modo a minimizar os efeitos da água sobre o pavimento e subleito;
- Implementar medidas que previnam o supercarregamento dos veículos de transporte, seja em peso ou volume (coroamento), evitando-se o encurtamento da vida útil do pavimento no primeiro caso ou a contaminação do material do revestimento pela mistura com material de queda dos caminhões nas vias;
- Controlar a poeira de forma a evitar que a visibilidade seja consideravelmente diminuída;
- Remover materiais caídos de equipamentos bem como qualquer material solto que possa estar presente sobre a superfície da estrada;
- Manter leiras de segurança e saídas de emergência;
- Periodicamente renivelar as estradas de forma a eliminar buracos, depressões e trilhas de roda antes que problemas mais sérios sejam causados;
- Treinar operadores para relatar imediatamente situações de perigo aos seus supervisores.

Por Oliveira Filho *et al.* (2010b), as operações de manutenção poderão ter um caráter rotineiro ou estrutural. As operações realizadas com grande frequência e que são destinadas a correção de defeitos que têm uma recorrência maior, ou até mesmo destinadas à prevenção desses defeitos, possuem caráter rotineiro. Já aqueles

procedimentos destinados à correção de defeitos excepcionais, em geral, possuem caráter estrutural, como nos casos em que os defeitos atingiram camadas estruturais do pavimento (base e sub-base) ou requerem a reconstrução de alguma estrutura de drenagem, por exemplo. Para que as operações de manutenção obtenham sucesso é necessário que se conheça o defeito que deverá ser eliminado e suas causas (Reis, 2014).

A diretriz de manutenção do Manual de Estradas de Acesso de Mina (Oliveira Filho *et al.*, 2010b) prioriza o fortalecimento da estrutura construída, e por isso recomenda a recolocação do material desagregado pelo uso, utilizando as técnicas de compactação nas camadas de subleito, sub-base e base. Para o anti-pó a técnica recomendada é a operação de tapa-buraco com recomposição de ligante e agregado. Para o bom atendimento funcional da estrada as atividades de manutenção que assegurem o correto funcionamento dos sistemas de drenagem superficial e profundo, é entendido que se trata de um dos principais fatores para evitar a formação dos defeitos em estradas de acesso de mina em períodos alternativos tanto em épocas de chuvas como de seca.

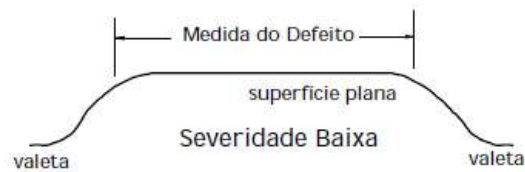
A seguir são apresentados os principais defeitos nas estradas que necessitam de manutenção, segundo (Oliveira Filho *et al.*, 2010b):

- *Seção transversal inadequada*

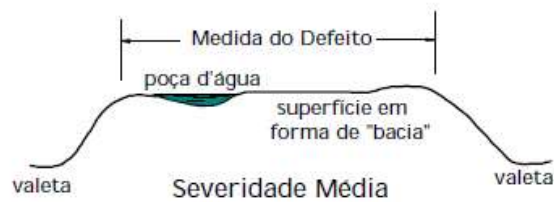
A seção transversal inadequada é o resultado de uma superfície sem declividade transversal para direcionar a água para as valetas. Esta condição é evidenciada pelo escoamento difuso ao longo da superfície de rolamento, favorecendo a infiltração, empoçamento e erosão excessiva causada pela intensidade da chuva.

Eaton *et. al.* (1987) e o RSMS (1991) classificam a qualidade da estrada de acordo com os níveis de severidade e extensão do defeito. Os níveis de severidade da seção transversal inadequada são:

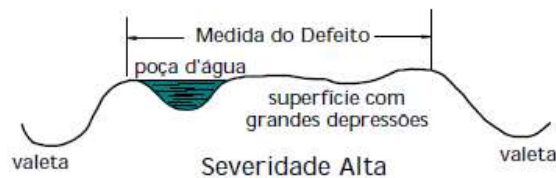
BAIXA: superfície completamente plana (sem declividade transversal);



MÉDIA: superfície em forma de bacia;



ALTA: grandes depressões nas trilhas das rodas na superfície da estrada.



- *Poeira*

Consiste na formação de uma nuvem de material fino quando da passagem dos caminhões. Pode comprometer a segurança do tráfego, sendo um problema mais evidente em estradas com solo argiloso, onde existe uma grande quantidade de material solto na superfície ou onde a ação abrasiva do tráfego solta as partículas aglutinantes dos agregados.

Além de prejudicar a visibilidade de motoristas e operadores, a poeira contribui para a poluição do ar e dificulta a posterior recomposição das frações de partículas e agregados das camadas mais nobres do pavimento (Ferreira, 2007).



Figura 11 - Condições precárias de visibilidade devido à excessiva formação de poeira

- *Corrugação*

A corrugação consiste de uma série de ondulações perpendiculares à direção do tráfego formadas, geralmente, em rampas ou curvas ou em áreas de aceleração ou desaceleração, causando grande desconforto para o tráfego de caminhões.

Uma solução para tal problema reside na utilização de um material de revestimento com composição balanceada, contando com certa fração plástica, conferindo-lhe aglutinação entre grãos e partículas. A figura 12 mostra uma pista de rolamento revestida com material granular que, no entanto, apresentou problemas de corrugações devido ao adiamento das manutenções periódicas (Ferreira, 2007).



Figura 12 - Corrugações na pista devido a ausência de manutenção

- *Buracos*

As principais causas de formação de buracos em estradas mineiras estão associadas a:

- (i) Inexistência ou deficiência da camada de revestimento primário;
- (ii) Ausência de partículas aglutinantes na composição dos materiais da superfície/ou camadas;
- (iii) Má drenagem da via.

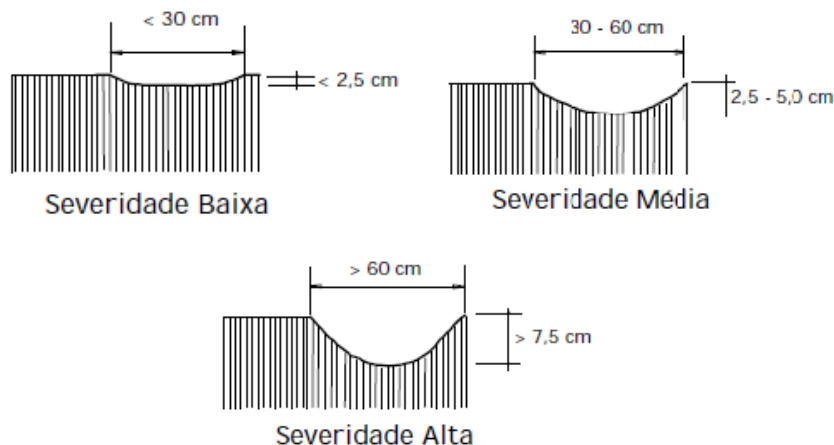
Este tipo de problema está geralmente associado à perda de partículas sólidas do pavimento, com maior ocorrência em materiais de natureza arenosa e pedregulhosa, na qual o fator coesão não se verifica satisfatoriamente. Medidas de correção podem variar desde operações “tapa-buracos” a reconformações da superfície de rolamento por meio de motoniveladoras (Ferreira, 2007).

Na avaliação das estradas não-pavimentadas, o RSMS (1991) classifica a qualidade da estrada de acordo com os seguintes níveis de severidade e extensão dos buracos:

**BAIXA:** buracos com profundidade menor que 2,5 cm e/ou diâmetro menor que 30 cm e menos que 10% da área total da superfície da estrada coberta por buracos e/ou menos que 5 buracos por seção;

**MÉDIA:** buracos com profundidade entre 2,5 e 5,0 cm e/ou diâmetro entre 30 e 60 cm e entre 10% e 30% da área total da superfície da estrada coberta por buracos e/ou menos que 5 a 10 buracos por seção;

**ALTA:** buracos com profundidade maior que 7,5 cm e/ou diâmetro maior que 60 cm e mais que 30% da área total da superfície da estrada coberta por buracos e/ou mais que 10 buracos por seção.



- *Trilhas de rodas*

A deformação permanente nas trilhas de rodas resulta da aplicação repetida das cargas do tráfego, particularmente em épocas de chuva, quando o solo saturado tem sua capacidade de suporte reduzida. Ocorre principalmente em estradas de acesso de mina com solo argiloso, podendo, em razão da falta de manutenção, estar associada ao crescimento de vegetação no centro da pista de rolamento, que dificulta ainda mais a passagem dos veículos.

Conforme o grau crescente de severidade do problema, as alternativas de solução variam desde simples regularizações da plataforma com motoniveladoras a serviços mais rigorosos de drenagem, substituição ou adição de materiais, compactação e execução de camadas de revestimento primário (Ferreira, 2007).

Na avaliação de estradas não-pavimentadas, Eaton *et. al.* (1987) e o RSMS (1991) classificam a qualidade da estrada de acordo com os seguintes níveis de severidade e extensão das trilhas de roda:

BAIXA: sulcos com profundidade menor que 2,5 cm (severidade baixa) e mens que 10% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos;



MÉDIA: sulcos com profundidade entre 2,5 e 7,5 cm (severidade média) e entre 10% e 30% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos;



ALTA: sulcos com profundidade maior que 7,5 cm (severidade alta) e mais que 30% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos.



Em sua dissertação de mestrado, Ferreira (2007), também cita outros problemas relacionados às estradas mineiras.

- *Drenagem inadequada*

Este defeito é caracterizado pelo acúmulo de água na plataforma da pista, decorrente do mal funcionamento dos dispositivos de drenagem superficial e da ausência de drenagem profunda, além da falta de manutenção das obras de arte correntes.

A solução para tal problema reside na recomposição da drenagem superficial (sarjetas ou valetas) e no tratamento do leito da pista porventura danificado (aeração, gradeamento e posterior compactação ou substituição por um material com melhor capacidade de suporte).

A drenagem lateral inadequada é verificada pelas valetas cobertas de vegetação ou cheias de entulhos e que não estão em condições próprias para direcionar e transportar a água, provocando o seu empoçamento.

Em termos de drenagem lateral, Eaton *et al.* (1987) e o RSMS (1991) classificam a qualidade da estrada de acordo com os seguintes níveis de severidade:

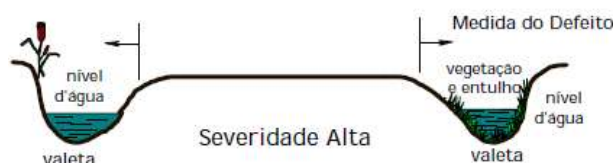
BAIXA: pequena quantidade de água empoeçada nas valetas e valetas em vegetação ou entulhos;



MÉDIA: quantidade moderada de água empoeçada na valeta; valetas com pequena quantidade de vegetação e entulhos e evidência de erosão das valetas do lado de dentro da estrada.



ALTA: grande quantidade de água nas valetas; valetas cobertas de vegetação e entulho e erosão das valetas do lado de dentro da estrada.



### 2.3 Sistemas de drenagem

Reis (2014) ressalta que o sistema de drenagem de estradas de mina é uma assunto controverso, uma vez que se confunde o sistema de drenagem em pilha ou da cava, com o da estrada. Ela também chama a atenção para o fato de que o planejamento de mina não trata o assunto ou o faz de forma simplificada, tendo como consequência problemas que são tratados tardiamente pela equipe de planejamento de curto prazo.

O Manual de Estrada de Acesso de Mina (Oliveira Filho *et al.*, 2010b) considera que um bom sistema de drenagem é essencial para uma estrada de terra. Sem uma eficiente drenagem, por melhores que sejam as condições técnicas da pista, mais cedo ou mais tarde sua deterioração será total ou muito exigirá em termos de reparação e manutenção. Em sua função primordial, a drenagem de uma estrada deve eliminar a água que, sob



qualquer forma, atinge o seu pavimento, captando-a e conduzindo-a para locais em que menos afete a segurança e durabilidade da via.

O abaulamento na seção transversal, canaletas laterais (sarjetas) e sangras (“bigodes”) disciplinam a água incidente escoada na superfície. Outros dispositivos como valetas de crista e de aterro impedem que a água afluyente atinja o corpo estradal; descidas d’água, caixas coletoras, bueiros formam outros elementos de drenagem superficial de uma estrada. Drenos de fundo completam a proteção da estrada ao interceptar ou drenar a água subterrânea ou a infiltrada que de outra forma possa saturar as camadas do pavimento e o subleito, diminuindo-lhe a capacidade de suporte.

O encaminhamento da água de escoamento que incide sobre a estrada constitui o objetivo da drenagem superficial e o da água de infiltração, o objetivo da drenagem profunda, subdrenagem ou drenagem subterrânea, sendo as infiltrações decorrentes das precipitações pluviométricas e também provenientes de lençóis d’água subterrâneos.

A seguir, são apresentados dois tipos de drenagem, superficial e drenos de fundo, os quais são abordados no Manual de Estradas de Acesso de Mina (Oliveira Filho *et al.*, 2010b).

### **2.3.1 Drenagem superficial**

A drenagem superficial de uma via tem como objetivo interceptar e captar, conduzindo ao deságüe seguro, as águas provenientes de suas áreas adjacentes e aquelas que se precipitam sobre o corpo da estrada, resguardando sua segurança e estabilidade. Para um sistema de drenagem superficial eficiente, utiliza-se uma série de dispositivos com objetivos específicos, a saber:

- Valetas de proteção de corte;
- Valetas de proteção de aterro;
- Sarjetas de corte;
- Sarjetas de aterro;
- Descidas d’água;

- Saídas d'água;
- Caixas coletoras;
- Bueiros de Greide;

### 2.3.1.1 Valetas de proteção de corte

As valetas de proteção de cortes têm como objetivo interceptar as águas que escorrem pelo terreno a montante, impedindo-as de atingir o talude de corte.

As valetas de proteção serão construídas em todos os trechos em corte onde o escoamento superficial proveniente dos terrenos adjacentes possa atingir o talude, comprometendo a estabilidade do corpo estradal. Deverão ser localizadas proximamente paralelas às cristas dos cortes, a uma distância entre 2,0 a 3,0 metros. O material resultante da escavação deve ser colocado entre a valeta e a crista do corte e apilado, conforme indicado na figura 13:

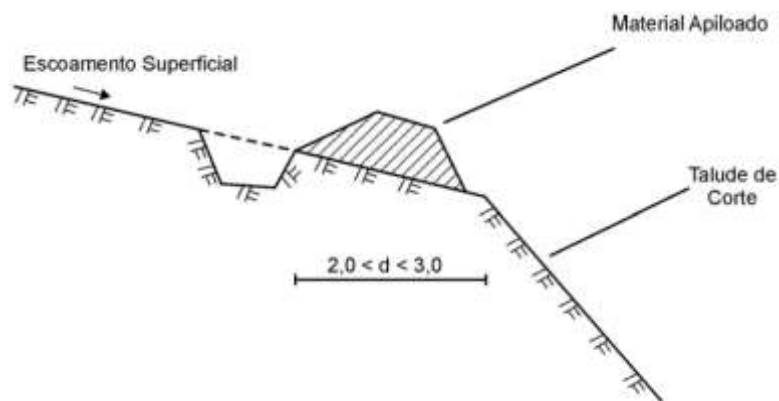


Figura 13- Valeta de proteção de corte

As valetas de proteção de cortes podem ser trapezoidais, retangulares ou triangulares, conforme ilustram as figuras abaixo.

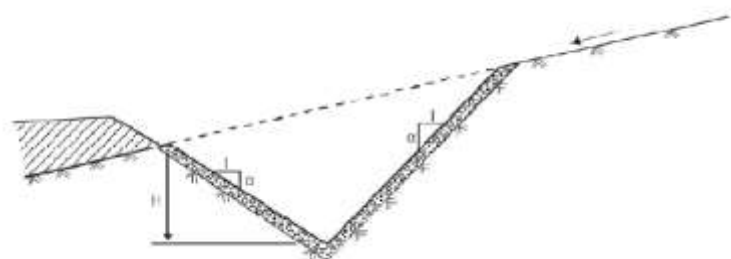


Figura 14 - Seção Triangular

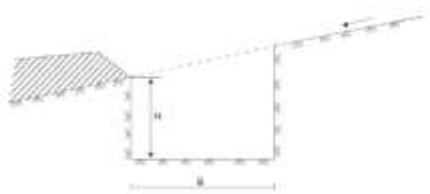


Figura 15 - Seção retangular

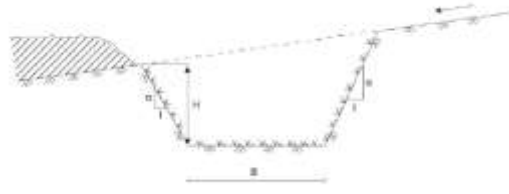


Figura 16 - Seção trapezoidal

As seções triangulares criam plano preferencial de escoamento d'água, por isso são pouco recomendadas para grandes vazões. Por motivo de facilidade de execução, a seção a adotar nos cortes em rocha deverá ser retangular. As valetas com forma trapezoidal são mais recomendáveis por apresentarem maior eficiência hidráulica.

*Revestimento:* deverão ser escolhidos de acordo com a velocidade do escoamento e conforme a natureza do material do solo.

Em princípio, convém sempre revestir as valetas, sendo isso obrigatório quando elas forem abertas em terreno permeável, para evitar que a infiltração provoque instabilidade no talude do corte. Atenção especial deve ser dada ao revestimento da valeta triangular, pois, pela própria forma da seção, há uma tendência mais acentuada à erosão e infiltração.

Os tipos de revestimentos mais recomendados são:

- Concreto;
- Alvenaria de tijolo ou pedra;
- Pedra arrumada;
- Vegetação.

### 2.3.1.2 Valetas de proteção de aterro

Têm como objetivo interceptar as águas que escoam pelo terreno a montante, impedindo-as de atingir o pé do talude de aterro. Além disso, podem ter a finalidade de receber as águas das sarjetas e valetas de corte, conduzindo-as com segurança ao dispositivo de transposição de talvegues.

As valetas de proteção de aterro deverão estar localizadas, aproximadamente paralelas ao pé do talude de aterro a uma distância entre 2,0 e 3,0 metros. O material resultante da escavação deve ser colocado entre a valeta e o pé do talude de aterro, apiloado com o objetivo de suavizar a interseção das superfícies do talude e do terreno natural.

As seções adotadas podem ser trapezoidais ou retangulares, como mostrado nas figuras a seguir:

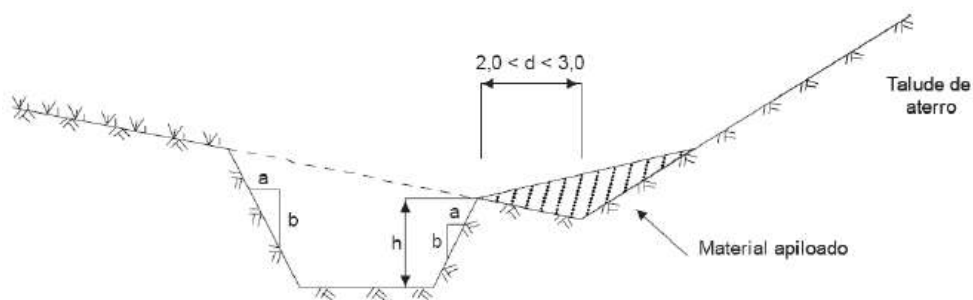


Figura 17 - Seção trapezoidal

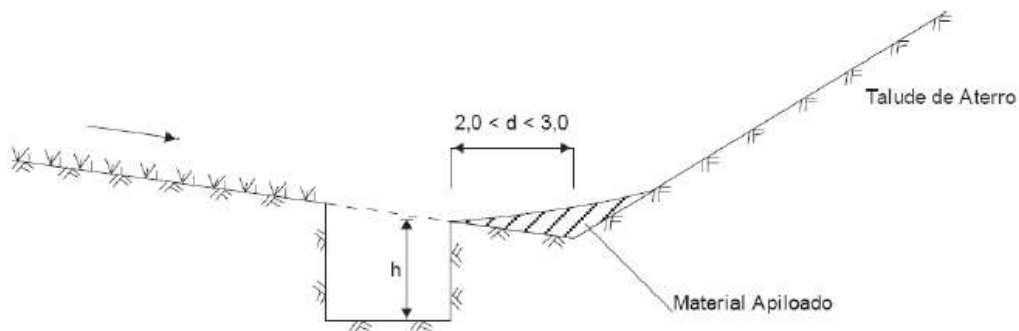


Figura 18 - Seção retangular

*Revestimento:* deverá ser escolhido de acordo com a velocidade do escoamento, natureza do solo e fatores de ordem econômica. Os tipos de revestimento mais recomendados são os mesmos das valetas de corte.

### 2.3.1.3 Sarjetas de corte

A sarjeta de corte (canaleta) tem como objetivo captar as águas que se precipitam sobre a plataforma e taludes de corte e conduzi-las, longitudinalmente à rodovia, até o

ponto de transição entre o corte e o aterro, de forma a permitir a saída lateral para o terreno natural ou para a valeta de aterro, ou então, para a caixa coletora de um bueiro de gradiente. As sarjetas devem localizar-se em todos os cortes, sendo construídas à margem das vias, terminando em pontos de saída convenientes (pontos de passagem de corte para aterro ou caixas coletoras).

As sarjetas de corte podem ter diversos tipos de seção, dependendo da capacidade de vazão necessária.

- Sarjeta triangular

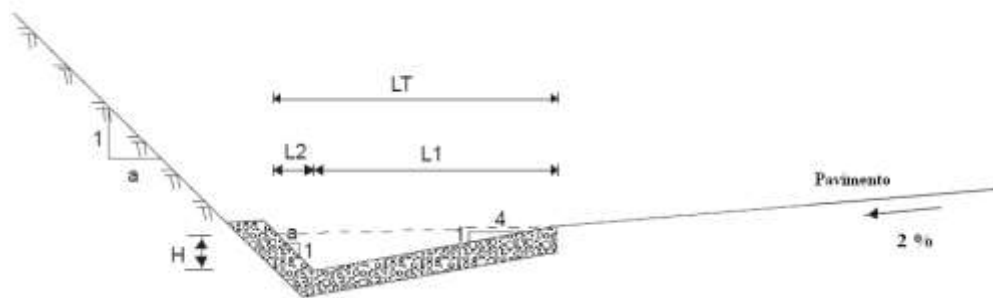


Figura 19 - Sarjeta triangular

A sarjeta triangular é um tipo bem aceito, pois apresenta uma razoável capacidade de vazão e aproveita espaço do acostamento. A sarjeta deve ter do lado do acostamento a declividade de 25% ou seja, 1:4, e do lado do talude a declividade deste.

- Sarjeta trapezoidal

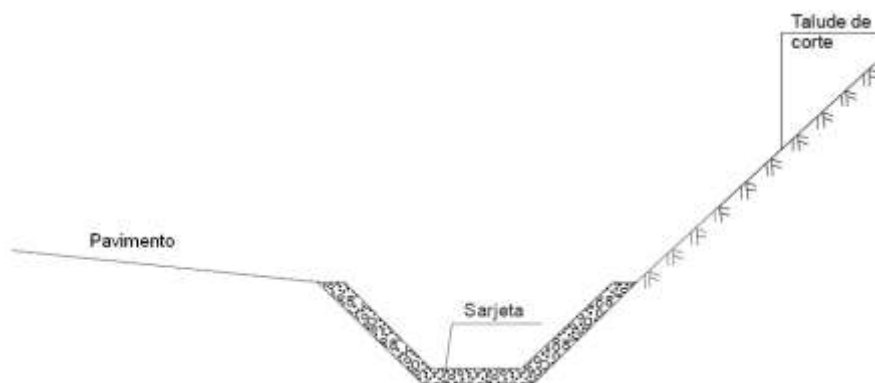


Figura 20 - Sarjeta trapezoidal

- Sarjeta retangular



Figura 21 - Sarjeta retangular

Quando a seção triangular não atender à vazão para a descarga de projeto, ou em caso de cortes em rocha pela facilidade de execução, pode-se optar pela sarjeta retangular.

#### 2.3.1.4 Sarjetas de aterro

A sarjeta de aterro tem como objetivo captar as águas precipitadas sobre a plataforma, de modo a impedir que provoquem erosões na borda do acostamento e/ou no talude do aterro, conduzindo-as ao local de deságue seguro.

A indicação da sarjeta de aterro deve fundamentar-se nas seguintes situações:

- trechos onde a velocidade das águas provenientes da pista provoque erosão na borda da plataforma ou borda da leira lateral;
- interseções, para coletar e conduzir as águas provenientes dos ramos, pilhas de estéril, etc.

A sarjeta de aterro posiciona-se na faixa da plataforma contígua ao acostamento.

A seção transversal pode ser triangular, trapezoidal, retangular, etc, de acordo com a natureza e a categoria da via.

Sendo a sarjeta de aterro um dispositivo que pode comprometer a estabilidade da via devido a sua maior susceptibilidade à erosão do talude em que se encontra, devemos tomar cuidados especiais com a mesma.

*Revestimento:* deve-se, todavia levar em conta a velocidade limite de erosão do material empregado.

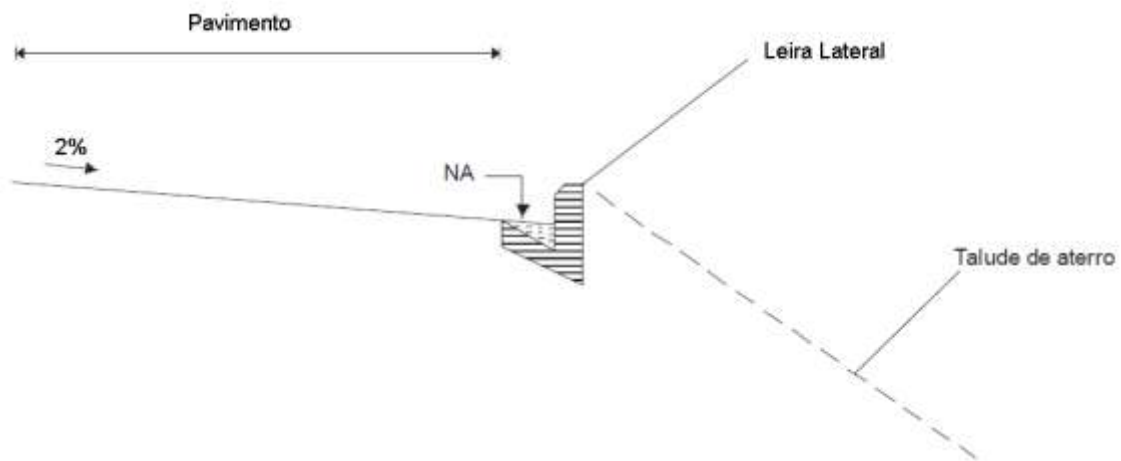


Figura 22 - Sarjeta de aterro

### 2.3.1.5 Saídas d'água

As saídas d'água são dispositivos destinados a conduzir as águas coletadas pelas sarjetas de aterro lançando-as nas descidas d'água. São, portanto, dispositivos de transição entre as sarjetas de aterro e as descidas d'água.

Localizam-se na borda da plataforma, junto aos acostamentos ou em alargamentos próprios para sua execução, nos pontos onde é atingido o comprimento crítico da sarjeta, nos pontos baixos das curvas verticais côncavas e algumas vezes, nos pontos de passagem de corte para aterro.

As saídas d'água devem ter uma seção tal que permita uma rápida captação das águas que escoam pela borda da plataforma conduzindo-as às descidas d'água.

O rebaixamento gradativo da seção, conforme mostrado nas figuras 23 e 24, é um método eficiente de captação.

Considerando sua localização, as saídas d'água devem ser projetadas obedecendo aos seguintes critérios:

a) Gradiente em rampa

Neste caso, o fluxo d'água se realiza num único sentido, como esquematicamente se mostra na figura 23:

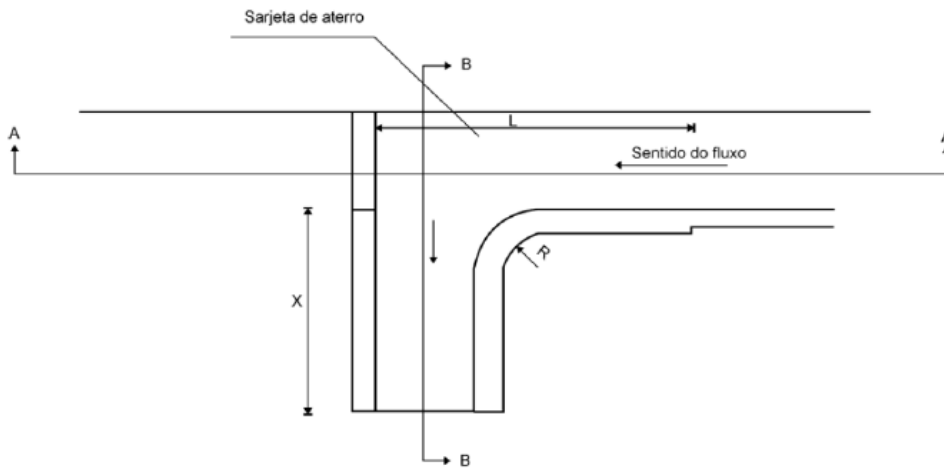


Figura 23 - Saída d'água de gradiente em rampa

b) Curva vertical côncava (ponto baixo)

Neste caso o fluxo d'água se dá nos dois sentidos, convergindo para um ponto baixo, como esquematicamente é mostrado na figura abaixo.

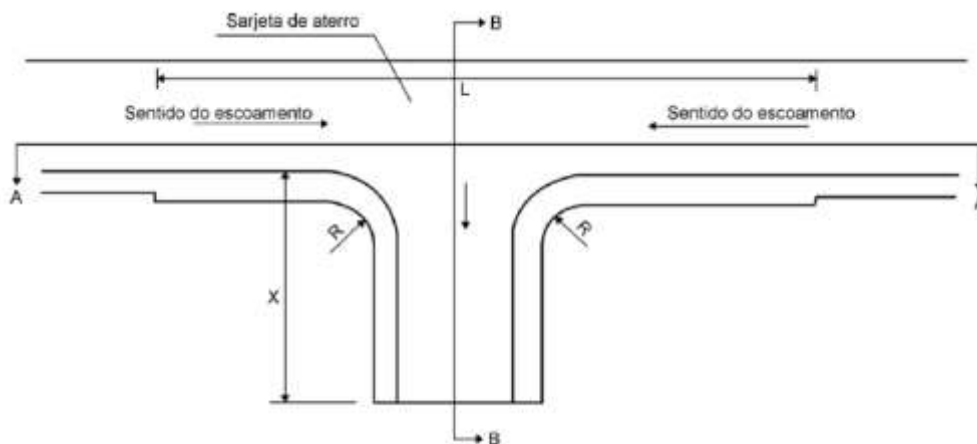


Figura 24 - Saída d'água de curva vertical côncava



*Revestimento:* podem ser preferencialmente de concreto com superfície lisa ou de chapas metálicas.

As saídas d'água de concreto são executadas no local conjuntamente com as descidas d'água. As chapas metálicas são moldadas no canteiro de obra e fixadas no local, através de chumbadores.

### **2.3.1.6 Descidas d'água**

As descidas d'água têm como objetivo conduzir as águas captadas por outros dispositivos de drenagem, pelos taludes de corte e aterro.

Tratando-se de cortes, as descidas d'água têm como objetivo principal conduzir as águas das valetas quando atingem seu comprimento crítico, ou de pequenos talvegues, desaguando numa caixa coletora ou na sarjeta de corte.

As descidas d'água podem ser do tipo rápido ou em degraus. A escolha entre um e outro tipo será função da velocidade limite do escoamento para que não provoque erosão, das características geotécnicas dos taludes, do terreno natural, da necessidade da quebra de energia do fluxo d'água e dos dispositivos de amortecimento na saída.

A análise técnica e econômica desse conjunto de fatores levará o projetista à escolha de uma descida do tipo rápido ou em degraus.

As descidas d'água podem ter a seção de vazão das seguintes formas:

- retangular, em calha tipo rápido ou em degraus;
- semicircular ou meia cana, de concreto ou metálica;
- em tubos de concreto ou metálicos.

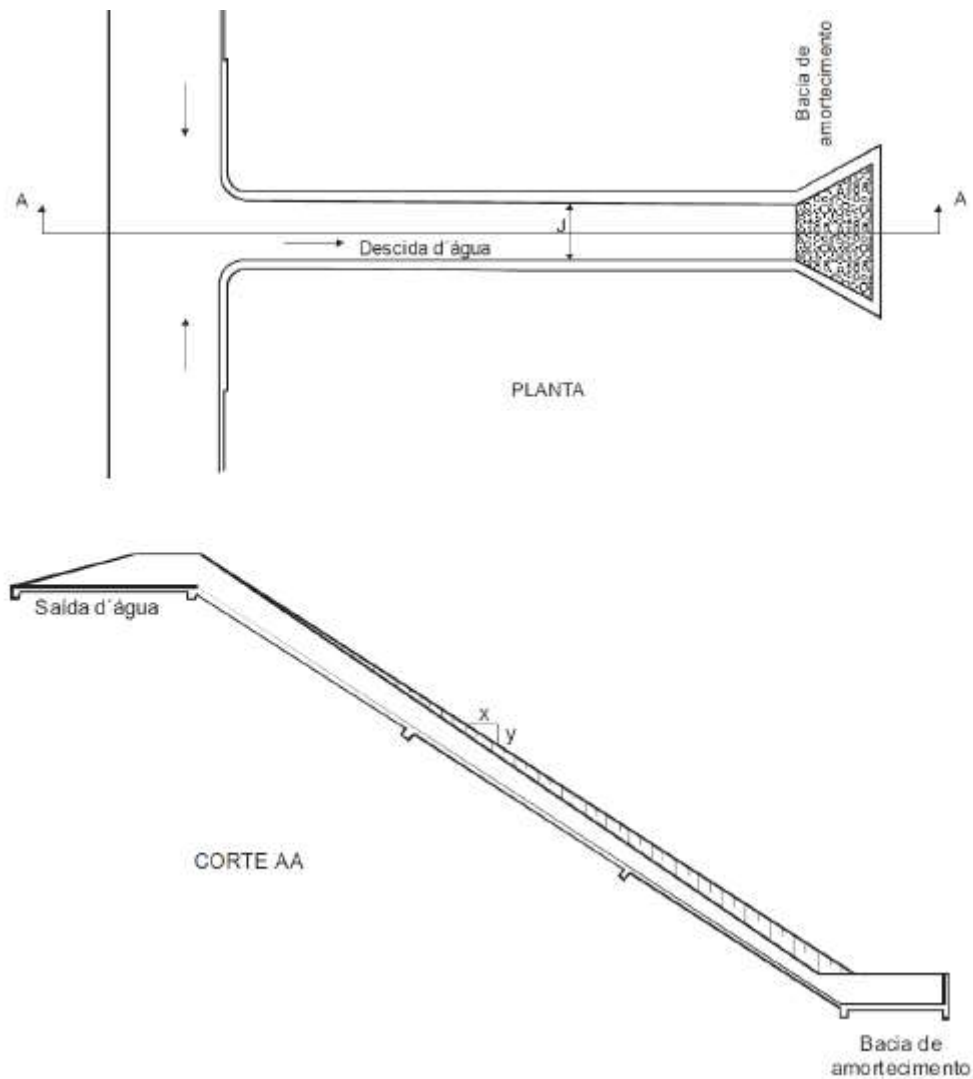


Figura 25: Descida d'água

### 2.3.1.7 Caixas coletoras

As caixas coletoras têm como objetivos principais:

- Coletar as águas provenientes das sarjetas e que se destinam aos bueiros de gradiente;
- Coletar as águas provenientes de áreas situadas a montante de bueiros de transposição de talwegues, permitindo sua construção abaixo do terreno natural;
- Coletar as águas provenientes das descidas d'água de cortes, conduzindo-as ao dispositivo de deságüe seguro;

- Permitir a inspeção dos condutos que por elas passam, com o objetivo de verificação de sua funcionalidade e eficiência;
- Possibilitar mudanças de dimensão de bueiros, de sua declividade e direção, ou ainda quando a um mesmo local concorre mais de um bueiro.

As caixas coletoras, quanto à sua função, podem ser: caixas de passagem ou caixas de contenção de sedimentos.

As caixas coletoras localizam-se:

- Nas extremidades dos comprimentos críticos das sarjetas de corte, conduzindo as águas para um bueiro ou coletor, que as levará para o deságüe apropriado.
- Nos pontos de passagem de cortes para aterros, coletando as águas das sarjetas, nos casos em que as águas ao atingir o terreno natural possam provocar erosões;
- Nas extremidades das descidas d'água de corte, quando se torna necessária a condução das águas desses dispositivos para fora do corte sem a utilização das sarjetas.
- No terreno natural, junto ao pé do aterro ou na junção de vias principais, quando se deseja conter os sedimentos carreados pela força cinética da água.
- Em qualquer lugar onde se torne necessário captar as águas superficiais, transferindo-as para bueiros ou bacias de sedimentação, não comprometendo a segurança do tráfego.

#### **2.3.1.8 Bueiros de gradiente**

Os bueiros de gradiente são dispositivos destinados a conduzir para locais de deságüe seguro as águas captadas pelas caixas coletoras.

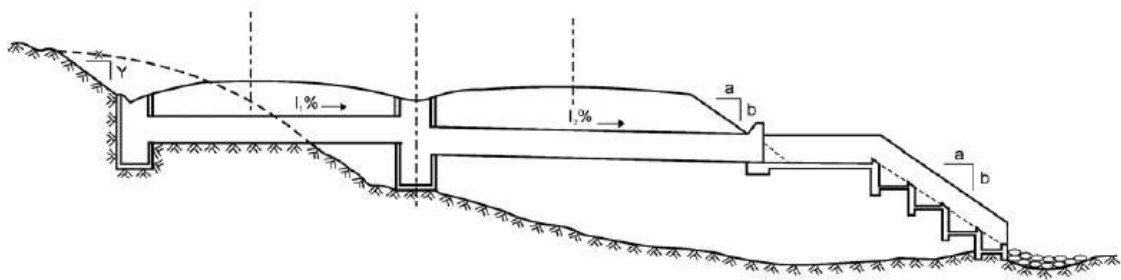


Figura 26 - Esquema de um bueiro de gradiente completo em aterro

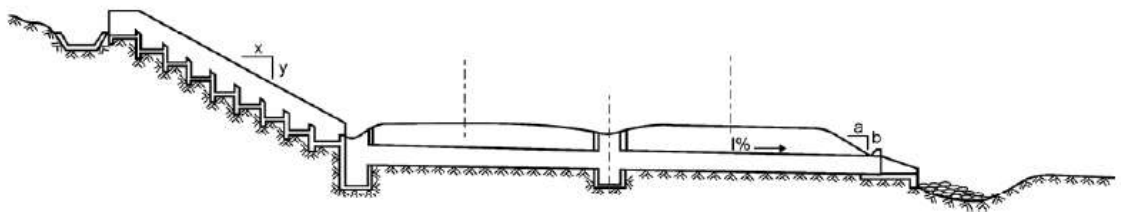


Figura 27 - Esquema de um bueiro de gradiente completo em corte

Os elementos constituintes de um bueiro de gradiente são;

- Caixas coletoras;
- Corpo;
- Boca.

As caixas coletoras poderão ser construídas de um lado da pista ou dos dois lados da pista.

O corpo do bueiro de gradiente é constituído em geral de tubos de concreto armado ou metálicos, obedecendo às mesmas considerações formuladas para os bueiros de transposição de talvegues.

A boca será construída à jusante, ao nível do terreno ou no talude de aterro, sendo neste caso necessário construir uma descida d'água geralmente dotada de bacia de amortecimento.

### 2.3.2 Drenos profundos

Os drenos profundos têm por objetivo principal interceptar o fluxo da água subterrânea através do rebaixamento do lençol freático, impedindo-o de atingir o subleito.

Os drenos profundos são instalados, preferencialmente, em profundidades da ordem de 1,50 a 2,00 m, tendo por finalidade captar e aliviar o lençol freático e, conseqüentemente, proteger o corpo estradal.

Devem ser instalados nos trechos em corte, nos terrenos planos que apresentem lençol freático próximo do subleito, bem como nas áreas eventualmente saturadas próximas ao pé dos taludes.

#### *Materiais:*

Os materiais empregados nos drenos profundos diferenciam-se de acordo com as suas funções, a saber:

- materiais filtrantes: areia, agregados britados, geotextil, etc.
- materiais drenantes: britas, cascalho grosso lavado, etc.
- materiais condutores: tubos de concreto (porosos ou perfurados), cerâmicos (perfurados), de fibro-cimento, de materiais plásticos (corrugados, flexíveis perfurados, ranhurados) e metálicos.

Há casos em que não são colocados tubos no interior dos drenos. Nestes casos eles são chamados de "drenos cegos".

### *Localização:*

Os drenos profundos devem ser instalados nos locais onde haja necessidade de interceptar e rebaixar o lençol freático, geralmente nas proximidades dos acostamentos.

Nos trechos em corte, recomenda-se que sejam instalados, no mínimo, a 1,50 m do pé dos taludes, para evitar futuros problemas de instabilidade.

Podem, também, ser instalados sob os aterros, quando ocorrer a possibilidade de aparecimento de água livre, bem como quando forem encontradas camadas permeáveis sobrepostas a outras impermeáveis, mesmo sem a presença de água na ocasião da pesquisa do lençol freático.

### *Elementos de Projeto*

Os drenos profundos são constituídos por vala, materiais drenante e filtrante, podendo apresentar tubos-dreno, juntas, caixas de inspeção e estruturas de deságue.

No caso de drenos com tubos podem ser utilizados envoltórios drenantes ou filtrantes constituídos de materiais naturais ou sintéticos.

- *Valas*

As valas, abertas manual ou mecanicamente, devem ter no fundo a largura mínima de 50cm e de boca a largura do fundo mais 10cm.

Sua altura vai depender da profundidade do lençol freático podendo chegar a 1,50m, ou no máximo 2,00m.

- *Material de enchimento*

O material de enchimento da vala pode ser filtrante ou drenante.

A função do material filtrante é a de permitir o escoamento da água sem carrear finos e conseqüentemente evitar a colmatação do dreno.

Poderão ser utilizados materiais naturais com granulometria apropriada ou geotexteis.

A função do material drenante é a de captar e ao mesmo tempo conduzir as águas a serem drenadas, devendo apresentar uma granulometria adequada à vazão escoada.

- *Tubos*

Devem ser constituídos por tubos de concreto, de cerâmica, de plástico rígido ou flexível corrugado, e metálicos.

Os diâmetros dos tubos comerciais variam de 10 a 15cm. Na medida da necessidade, poderão ser perfurados, no canteiro de obras, tubos de diâmetros maiores.

Os tubos de concreto podem conter furos com diâmetros variando de 6 a 10mm, sendo que nos tubos de materiais plásticos flexíveis corrugados são utilizadas ranhuras de 0,6 a 10mm.

Os tubos deverão ser instalados com os furos voltados para cima, em casos especiais de terrenos altamente porosos ou rochas com fendas amplas.

A posição dos furos, voltados para cima, exige que se encha a base da vala do dreno com material impermeável até a altura dos furos iniciais e na outra condição deve-se colocar filtro como material de proteção no fundo da vala.

No caso de tubos plásticos corrugados flexíveis, por disporem de orifícios em todo o perímetro, não há necessidade de direcionar as aberturas de entrada d'água.

## **2.4 Estudo de caso**

Para ilustrar este trabalho, será apresentado como estudo de caso, com base em dados coletados e apresentados por Sousa (2011) em sua tese de mestrado “Estudos de dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto”. Eles demonstram a prática da empresa VALE quanto à implantação e manutenção das estradas e os procedimentos de projeto adotados de acordo com a realidade e peculiaridades de suas minas. Foram realizadas visitas técnicas às minas, relatórios de inventários e compilação de dados dos formulários preenchidos pelos responsáveis das minas.

Ao todo foram visitadas 24 minas e distribuídos 12 questionários em seis Complexos dos Sistemas Sul, Sudeste e Norte da Vale S.A.

### **2.4.1 Dados básicos de projeto**

Em geral, os equipamentos de transporte de minério e estéril são compostos por caminhões fora de estrada e/ou caminhões rodoviários traçados, podendo haver frotas mistas. A determinação e o dimensionamento da frota dependem de diversos fatores, tais como volume de material movimentado, dimensões dos equipamentos de carregamento, aproveitamento de frota *do modus operandi* de gestões feitas por empresas controladoras anteriores e limitações devidas a interações com populações vizinhas.

A vida útil dos acessos varia em função do sequenciamento de lavra projetado pelas equipes de planejamento. Os acessos de curto prazo duram até quatro meses (rampas internas à cava), seguidos por acessos de até dois anos em vias de duração média. Os acessos classificados como permanentes podem durar mais de 10 anos.

### **2.4.2 Projeto geométrico**

As especificações geométricas das vias variam em função dos tipos de equipamentos de transporte.



- Largura média das estradas: 27 m para caminhões fora de estrada e 14 m para caminhões rodoviários;
- Caimentos transversais de até 5% para direcionamento do fluxo de água;
- Inclinação média das rampas: 7% e 13%, para os dois tipos de caminhões, respectivamente.
- Leiras de proteção:

Em algumas minas existem leiras internas de proteção para diferenciar mão e contramão, como mostrado na figura 28:



Figura 28 - Leiras de proteção centrais (Sousa, 2011)

Leiras externas, localizadas nas laterais das estradas, como mostra a figura 29:



Figura 29 - Leiras de proteção laterais construídas em minério e estéril (Sousa, 2011)

Leiras são usadas para separar o tráfego de veículos leves do transporte realizado pelos veículos de carga, como mostra a figura 30:



Figura 30 - Leiras de separação entre acessos de equipamentos pesados e leves (Sousa, 2011)

A altura das leiras é, em geral, igual a  $\frac{2}{3}$  do tamanho do pneu do maior equipamento que trafega na via (figura 31).



Figura 31 - Leira trapezoidal com dimensões adequadas (Sousa, 2011)

A velocidade máxima descrita no manual dos equipamentos e as limitações de segurança determinadas pelas minas são respeitadas. No geral, a velocidade média é 32 km/h e 20 km/h para caminhões fora de estrada e rodoviários, respectivamente.

A distância média de transporte (DMT) das frentes de lavra às instalações de tratamento de minério e às pilhas de estéril é, em média, 3,5 km, com alguns relatos de distâncias atingindo até 9 km, no segundo caso.

Em algumas minas existem saídas de emergências ao longo das vias, cuja finalidade é evitar acidentes causados por falhas no sistema de frenagem dos equipamentos (figura 32).



Figura 32: Saída de emergência (Sousa, 2011)

Certas especificações de traçado geométrico tais como raio de curvatura, superlargura e superelevação, são definidas de acordo com a velocidade de tráfego, as diretrizes determinadas nos manuais dos equipamentos e a experiência prática das equipes de infraestrutura e topografia. Em algumas seções típicas das estradas é possível perceber uma suave superelevação e o abaulamento das pistas para o adequado direcionamento da água (figura 33).



Figura 33 – Superelevação (Sousa, 2011)

### **2.4.3 Projeto estrutural**

#### *Materiais de construção in situ*

A escolha de materiais para as camadas estruturais do pavimento (base e sub-base) é pautada pelo uso de materiais disponíveis nas próprias minas, resultantes de decapeamento e da lavra de minérios. Gnaisses e xistos são exemplos de materiais utilizados na formação de camadas de base e sub-base. Por fornecerem melhor resultado na compactação, os gnaisses são usados preferencialmente aos xistos. Eventualmente, usam-se quartzitos alterados e lateritas.

### **2.4.4 Projeto funcional**

Para o revestimento também são utilizados materiais disponíveis na área dos empreendimentos, considerando-se fatores como compactação de camadas, minimização de geração de poeira e menor abrasividade.

Alguns dos materiais usados para revestimento são: canga com alumina e fósforo altos, rocha máfica sã, jaspilite e a própria hematita (hematita mole pulverulenta friável), quando as pistas são formadas em acessos internos ou quando o seu uso torna-se necessário para diminuir a abrasividade. Comparando-se os três primeiros tipos de material, a canga se mostra mais apropriada para ser usada como revestimento, pois fornece melhor sustentação e compactação, além de ser menos abrasiva do que os outros dois.

Foram verificadas várias ocorrências de solos lateríticos na forma de argila ferruginosa vermelha branda. Esse material possui baixa capacidade de suporte.

A figura 34 mostra uma carregadeira operando em praça sobre argila ferruginosa. Carregadeiras e escavadeiras de grande porte, por serem muito robustas e permanecerem longos períodos nas mesmas frentes de lavra, exigem tratamento diferenciado no piso das praças de operação sobre materiais pouco competentes como esse. A construção de praças de operação nessas condições se dá pela abertura de

trincheiras, basculamento de uma camada de 1,5 m de espessura de revestimento e espalhamento por trator de pneus.



Figura 34 - Carregadeira sobre argila ferruginosa pouco competente (Sousa, 2011)

A espessura do revestimento varia de 0,20 m a 0,80 m, sendo este último valor aplicado quando se tem uma camada única de pavimento. Acessos separados para veículos leves são revestidos com 0,20 m a 0,30 m de material.

Rejeitos de jigagem (figura 35) são utilizados como revestimento, sendo formadas camadas que variam entre 0,40 m e 0,50 m. O rejeito é um material poroso com características drenantes, sendo ideal para uso como revestimento. Existem locais próprios que esse material fique estocado para esta utilização específica. No período chuvoso, por se tratar de um material de granulometria grosseira, é substituído por itabirito compacto.



Figura 35 - Rejeito de jigagem (Sousa, 2011)

Quando não há disponibilidade de canga, os principais acessos de longa duração podem ser revestidos com uma camada de 1,0 m a 1,5 m de espessura de blocos grandes (aproximadamente 0,50 m de diâmetro) de itabirito hidratado (figura 36). Essa dimensão dos blocos respeita o tamanho máximo da partícula, que deve ser 0,67 vezes a espessura da camada. Esse é um material típico para recobrimento da praça de operação de escavadeiras robustas. Apesar de sua característica drenante, há a tendência de geração de muita poeira, tornando-se inevitável a necessidade de umidificar os acessos frequentemente. Quando o material encontrado *in situ* é carbonático ou filítico é necessário removê-lo.



Figura 36 - Itabirito hidratado (Sousa, 2011)

#### **2.4.5 Projeto de drenagem**

Com o intuito de evitar-se saturação das pistas, formação de poças d'água e processos erosivos, são executados direcionamentos transversais de drenagem em muitos acessos, ora com pista abaulada (caimento central), ora com caimento preferencial para um lado. Longitudinalmente às pistas, canaletas laterais formadas no encontro do próprio pavimento com as leiras ou taludes de corte recolhem as águas da pista e as deságuam em saídas laterais sem ou com enrocamento de espaçamento variável, dependendo da declividade. Tais saídas provocam diminuição da energia no fluxo da água, prevenindo erosões na estrada e nos taludes subjacentes.

Existem acessos em algumas minas com saídas para que a água seja direcionada para áreas de descarga que terminam em pequenas bacias. Tais bacias promovem retenção de

água para decantação dos finos carregados, evitando-se o assoreamento de cursos d'água (figura 37).



Figura 37 - Saída nas laterais das vias direcionando a drenagem e aspecto construtivo da drenagem nas saídas laterais (Sousa, 2011)

Proteções de saídas laterais são vistas em algumas minas, assim como sistemas de poços e galerias subterrâneas para drenagem de água superficial, que é reaproveitada na usina junto com a água de rebaixamento de lençol freático.

Há a presença de *sumps* (figura 38) independentes localizados em diferentes níveis para facilitar a drenagem da água. Os *sumps* contêm cal que promove a decantação de material fino, viabilizando o bombeamento de água limpa.



Figura 38 - Sump para drenagem da água (Sousa, 2011)

Existem projetos de drenagem da cava, verificados em campo por bermas estreitas de 10 m de largura, construídas exclusivamente com a finalidade de direcionar o fluxo de água da mina (figura 39). Tais bermas possuem caimentos transversal e longitudinal de

5% e 2%, respectivamente. Há limpeza do fundo da cava, caracterizada como “outras movimentações” sendo que grande parte do material recuperado é reaproveitado no processo produtivo.



Figura 39 - Bermas para direcionamento de drenagem (Sousa, 2011)

Os planos de drenagem são normalmente executados preliminarmente ao período chuvoso pelas áreas de planejamento de lavra e operação de mina em conjunto com equipes de geotecnia. Em várias minas a água é drenada para o fundo da cava e bombeada através de poços. A água bombeada é destinada ao abastecimento de caminhões pipa, plantas de beneficiamento, companhias de fornecimento de água e abastecimento de condomínios. O excesso de água proveniente dos poços é direcionado para córregos.

Atenção especial deve ser dada aos elementos de drenagem nas frentes de lavra, especialmente nas praças de carregamento, pois é importante que estas áreas produtivas estejam sempre em boas condições de operação.

#### **2.4.6 Manutenção**

Procedimentos operacionais como nivelamento, escarificação da superfície, reposição e substituição de material de revestimento, correção pontual de borrachudos por obturação (correção da região afetada com nova camada de material competente) e umidificação das pistas, são práticas comuns de manutenção nas minas pesquisadas. O



objetivo primordial dessas tarefas é melhorar a trafegabilidade dos equipamentos em termos de condições de rolamento e aderência.

A limpeza e a regularização das estradas através do uso de motoniveladora são relatadas como atividades de frequência diária, operando-se em trechos identificados pelas equipes de manutenção e também através de informações repassadas pelos motoristas dos caminhões via despacho.

A reposição de material de revestimento é feita conforme necessário, a fim de evitar-se a remoção excessiva de material do pavimento, o que poderia provocar o alcance das camadas inferiores. A substituição de material do revestimento tem caráter preventivo e resume-se à colocação de material mais granular na época de estiagem para evitar geração excessiva de pó, e material mais argiloso na época de chuva para evitar carregamento das partículas que compõem o revestimento.

Programas de inspeção e conservação de acessos para aumentar a vida útil de pneus de caminhões fora de estrada são conduzidos através de vistorias em campo feitas nos acessos de interesse. São constituídos por informes semanais de inspeção de pistas contendo o setor analisado, a situação atual e comentários.

Os principais equipamentos de infraestrutura encontrados nas minas visitadas são motoniveladoras, pás carregadeiras, tratores de pneu e de esteira e retro escavadeiras. Eles são utilizados na construção e manutenção dos acessos e de elementos de drenagem superficial, apoio nas praças das escavadeiras, serviços de compactação, retirada de materiais das bordas das estradas, construção de leiras e execução de camada de revestimento.

#### **2.4.7 Modelo de emissão de particulados**

Em relação ao controle de particulados em suspensão, provenientes da movimentação de equipamentos nas vias, alguns empreendimentos contam com instrumentos de monitoramento da qualidade do ar, localizados em pontos estratégicos das minas e nas localidades próximas.

Em todas as minas visitadas existem sistemas de aspersão, para auxiliar na redução da quantidade de partículas em suspensão no ar. A aspersão pode ser feita por caminhão pipa rodoviário (figura 40), caminhão fora de estrada adaptado (figura 41) ou através de aspersores fixos (figura 42). A aspersão fixa, quando existente, varia desde sistemas simplificados com acionamento e controle manuais, até sistemas de acionamento remoto de tecnologia moderna, controlado via salas de despacho. Normalmente ela é instalada nas vias principais de acesso às minas e nos acessos internos com grande movimentação de equipamentos. O controle de pó é naturalmente mais intenso nos meses de estiagem. A água utilizada na aspersão fixa é normalmente captada em barragens próximas e nas usinas de beneficiamento dos empreendimentos.



Figura 40 - Caminhão pipa convencional (Sousa, 2011)



Figura 41 - Caminhão fora de estrada adaptado para uso como caminhão pipa (Sousa, 2011)



Figura 42 - Aspersão fixa ao longo da extensão de uma estrada de acesso principal às minas(Sousa, 2011)

Quando existente, o sistema de aspersão fixo combinado com a aspersão feita por caminhões é extremamente produtivo para o controle de emissão de particulados em suspensão.

#### **2.4.8 Métodos Construtivos**

Em geral, os acessos são construídos em terrenos competentes (subleitos constituídos por hematitas e itabiritos), com nível d'água subterrânea profundo ou rebaixado por bombeamento. A boa capacidade de suporte é característica em rampas de cavas profundas, onde é comum a existência de rocha compacta, também presente nos terrenos naturais firmes dos acessos a plantas e pilhas de estéril.

A espessura das camadas que compõem os pavimentos é muito variável, de 1 a 5 m para a base, com valores médios de 2,5 m, dependendo do material *in situ* existente no subleito. Camadas de canga, largamente utilizadas como materiais de revestimento são, por vezes, utilizadas como material de base, em espessuras de até 1,20 m.

Normalmente, a construção dos pavimentos é feita pela abertura do terreno, seguida de raspagem, disposição de material de revestimento por caminhões, espalhamento por tratores e acabamento final por motoniveladora. Em geral, a compactação das vias é feita pelo próprio tráfego de tratores, escavadeiras, carregadeiras e principalmente caminhões, durante o ciclo de operação da mina. Apesar de ser mais apropriado para a compactação do que os caminhões, visto que dentre outras vantagens promove

densificação mais uniforme das camadas, o rolo compactador não é usualmente utilizado, tendo sido constatado em apenas duas minas.

## **CAPÍTULO 3**

### **Análise dos resultados**

#### **3.1 Conclusão**

Analisando a bibliografia apresentada percebe-se que um bom dimensionamento das estradas mineiras acarreta em impactos positivos na segurança, produtividade e manutenção das minas. Um projeto de estrada mineira pode variar de uma mina para outra, se adequando para o melhor aproveitamento do corpo mineral. Os elementos apresentados nem sempre são ou podem ser executados na construção das estradas, porém o mau dimensionamento de uma via pode acarretar em sérios problemas, principalmente estruturais, sendo necessárias medidas mais severas, como a necessidade de reparação dos pavimentos. A manutenção preventiva é a melhor forma de evitar alguns problemas, como poeira, buracos, remoção de materiais caídos, construção de leiras, entre outras. Entretanto, o que se percebe é que a maioria das minas praticam a manutenção corretiva, ou seja, buscam reparar os danos quando estes já existem, aumentando assim os custos com manutenção.

Compreende-se então, que na mineração uma atividade está ligada a outra, de forma que uma ação impacta em outra, ou seja, uma estrada bem projetada resulta em uma mina mais segura, produtiva e lucrativa. Já quando ocorre o contrário, encontra-se grandes problemas estruturais, falta de segurança, aumento de custos, baixa lucratividade e produtividade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, Jair (2014) Projeto geométrico estrada. Aula 6. Distância de visibilidade
- Baesso, D. P.; Gonçalves, F. L. R. (2003). Estradas rurais. Técnicas adequadas de manutenção. Florianópolis: DER. 236p.
- Brasil (1999) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais. 195 p.
- Eaton, R. A.; Beaucham, R. E. (1987). Unsurfaced Road Maintenance Management. Special Report 92-96. U. S. Army Corps of Engineers. Cold Regions Research & Engineering Laboratory.
- Ferreira, R. M. Dimensionamento de um Pavimento Experimental para o Tráfego de Caminhões Fora-de-estrada em Planta de Mina. 2007. 305 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Programa de Pós-Graduação do Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007.
- Ferreira, R.M. (2007) Dimensionamento de um Pavimento Experimental para o Tráfego de Caminhão Fora de Estrada em Planta de Mina. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG.
- Griebeler, N. P. (2002). Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 121 f., Viçosa.
- Holman, Pete (2006) Caterpillar Haul Road Design and Management. Big Iron University, 31p.
- Hugo, D. (2005). Haul Road defect identification and condition assessment using measured truck response. Dissertation (Master of Engineering in the Department of Mechanical and Aeronautical Engineering) – University of Pretoria, 109 f., Pretoria.
- Kaufman, W.W. & Autin, J.C. (1977) Design of Surface Mining Haulage Roads – a Manual. U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, Information Circular 8758.
- Lima, Hernani Mota de (2013) Notas de aula. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG.
- Monenco (1989) Design Manual for Surface Mine Haul Roads. Draft Report by Monenco Consultants Limited, Calgary, Alberta.
- Oliveira Filho, W. L. de; Fernandes, G.; Sousa, L. M. L. S. de; Costa Filho, W. D.; Rodrigues, C. A. F.; Van Ham, G. H. J. (2010a). Relatório de Inventário de Estradas de Acesso de Mina. Relatório interno. Convênio Vale UFOP, 12 p., Ouro Preto.
- Oliveira Filho, W. L.; Fernandes G.; Van Ham, G. H. J.; Rodrigues, C.A.; Masetti, L.; Costa, W. Manual de Estradas de Acesso de Mina. Ouro Preto, 2010b. 183p.
- Oliveira, J. F. de; Griebeler, N. P.; Correchel, V. e Silva, V. C. da. (2009). Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, supl. 0, Campina Grande.

Reis, M. S. Classificação e Diagnóstico das Estradas de Mina de Lavra a Céu Aberto de Minério de Ferro dentro do Quadrilátero Ferrífero. 2014. 4p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2014.

RSMS (1991). Road Surface Management System. Technology Transfer Center the University of New Hampshire, Department of Civil Engineering, Durham, New Hampshire.

Sousa, L. M. L. S. Estudos de Dimensionamento Estrutural de Estradas de Mina a Céu Aberto. 2011. 200 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

Tannant, D.D. e Regensburg, B. (2001) Guidelines for Mine Haul Road Design. University of British Columbia, Canada

Thompson, R.J. e Visser, A.T. (1999) Designing and Managing Unpaved Opencast Mine Haul Roads for Optimum Performance. American Society of Mining Engineers (SME) – Annual Meeting and Exhibition, Denver, CO, 1-3 (CD edition).

Visser, A.T. (2008) Basic Haul Road Design and Construction Training. Vale training course.