



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



CAROLINA MENDONÇA DOS SANTOS

PAVIMENTAÇÃO DE ESTRADAS DE MINA - UM ESTUDO DE CASO DO
COMPLEXO MARIANA, VALE S/A

Ouro Preto
2021

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

CAROLINA MENDONÇA DOS SANTOS

PAVIMENTAÇÃO DE ESTRADAS DE MINA - UM ESTUDO DE CASO DO
COMPLEXO MARIANA, VALE S/A

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto (UFOP, MG), como
requisito parcial para a obtenção do grau
de Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo
Ortiz

Ouro Preto
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237p Santos, Carolina Mendonça dos.

Pavimentação de estradas de mina [manuscrito]: um estudo de caso do Complexo Mariana, VALE S/A. / Carolina Mendonça dos Santos. - 2021.
92 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

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

1. Lavra de minas. 2. Minas e mineração - Carregamento e transporte. 3. Pavimentos. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.68



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dezesseis dias do mês de agosto de 2021, às 18:00 horas, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Carolina Mendonça dos Santos**, intitulado: **"PAVIMENTAÇÃO DE ESTRADAS DE MINA - UM ESTUDO DE CASO DO COMPLEXO MARIANA, VALE S/A"**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz, Prof. Dr. Hernani Mota de Lima e M. Sc. Pedro Guilherme Cipriano Silva. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu à discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 15 (quinze) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, segundo, o M. Sc. Pedro Guilherme Cipriano Silva e em último, o Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou à discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão da discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que a discente foi **APROVADA** por unanimidade, com a nota 10,0), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão. A discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 16 de agosto de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Membro: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Membro: M. Sc. Pedro Guilherme Cipriano Silva

Discente: Carolina Mendonça dos Santos

Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço primeiramente a Deus por cada oportunidade que Ele me concedeu, por todo amor, sustento e cuidado, por ter me dado a força necessária para chegar até aqui, e por ter me capacitado. Á Ele seja dada toda honra e toda glória.

Aos meus pais Ercilia e Pedro (*in memoriam*), por serem parte essencial de tudo isso, por toda dedicação e amor, por me sustentarem constantemente em oração, por todo ensinamento e incentivo em minha vida, por acreditarem que eu chegaria aqui e por serem minha base em todos os momentos. Minha eterna gratidão a vocês.

Aos meus irmãos Pedro Eric, Janderson, Leandro e Kellerson, por sempre acreditarem em mim, me aconselharem e me incentivarem.

Ao Ulysses, que caminhou comigo durante está jornada, agradeço pelo apoio, pela compreensão e paciência, e principalmente pelo companheirismo. Aos meus sogros por serem minha segunda família.

Aos meus sobrinhos por todo amor, alegria e carinho sem igual.

A Primeira Igreja Batista de Mariana pelo cuidado e suporte, principalmente em oração.

A equipe do TFD por toda paciência e apoio durante esses anos.

Aos amigos que a UFOP me presenteou e que se tornaram família, por terem compartilhado a vida comigo.

Aos professores, em especial ao Professor Arroyo, por todo conhecimento transmitido a mim e por toda orientação. A minha mentora e amiga “Camilinha”, por me mostrar que eu conseguiria e por ser tão solícita e dedicada a mim.

A empresa VALE pela oportunidade, por todo conhecimento adquirido e por toda contribuição nesse trabalho, em especial a todos da Infraestrutura

de Mina, por todo carinho, acolhimento, ensinamentos, risadas e por toda dedicação à mim.

A UFOP, a Fundação Gorceix e a gloriosa Escola de Minas, por proporcionarem a realização desse sonho maravilhoso.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

*Este é o mistério da vida cristã: Nós
lutamos, nós trabalhamos, nós
buscamos. Mas quando terminamos,
dizemos: Não fui eu, foi a Graça de
Deus em mim.
(John Piper, 1997)*

RESUMO

As estradas ou acessos de uma mina têm como função permitir a acessibilidade dos equipamentos de transporte, carga e outros ao corpo mineral. Elas devem atender parâmetros referentes à capacidade de suporte aos carregamentos impostos, garantindo produtividade, economicidade, e principalmente, segurança. O objetivo desse trabalho foi investigar e analisar metodologias de projetos de pavimentação de estradas de mina, especificamente a metodologia aplicada para os pavimentos dos acessos das minas do Complexo Mariana, da mineradora Vale S/A, onde o processo de pavimento é chamado de blindagem de acessos. Para tanto, foi realizado um estudo de caso nesse complexo minerador, analisando a metodologia utilizada e a efetividade da pavimentação de estradas de minas. Verificou-se, que apesar de um dos métodos mais usuais para dimensionamento de pavimentos de acessos de mina, o método do CBR e da carga de roda, atender e apresentar algumas vantagens quanto ao projeto de pavimentação em vias mineiras, ele não contempla algumas propriedades específicas do empreendimento minerário. A partir das lacunas teóricas e práticas identificadas, sugeriu-se melhores práticas metodológicas no dimensionamento de pavimentos em estradas de acessos de mina. Assim, como a importância da aplicação de metodologias de dimensionamento de pavimentos, que abranjam o máximo de parâmetros e aspectos relacionados as características e necessidades dos acessos de mina.

Palavras-chave: Pavimentação de estradas de mina. Acessos de mina. Dimensionamento de pavimentos. Complexo Mariana.

ABSTRACT

The function of roads or accesses to a mine is to allow accessibility of transportation equipment, cargo, and others to the ore body. They must meet parameters related to the ability to support the imposed loads, ensuring productivity, economy, and especially safety. The objective of this work was to investigate and analyze paving design methodologies for mine roads, specifically the methodology applied to the paving of access roads to the mines of the Mariana Complex, of the mining company Vale S/A, where the paving process is called access armoring. To this end, a case study was conducted at this mining complex, analyzing the methodology used and the effectiveness of the paving of mine roads. It was found that although one of the most usual methods for designing mine access sidewalks, the CBR and wheel load method, meets and presents some advantages regarding the paving project in mining roads, it does not take into account some specific properties of the mining enterprise. Based on the theoretical and practical gaps identified, better methodological practices in the design of sidewalks for mine access roads were suggested. As well as the importance of applying sidewalk design methodologies that cover as many parameters and aspects related to the characteristics and needs of mine access roads as possible.

Keywords: Mine road paving. Mine accesses. Sidewalk design. Mariana Complex

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas de projetos de estradas	19
Figura 2- Elementos do projeto geométrico de estradas	20
Figura 3 - Elementos do projeto de pavimentação	21
Figura 4 - Projeto de pavimento de mina	22
Figura 5 - Diferentes tipos de projetos de pavimentação	24
Figura 6 - Importância da drenagem superficial de vias de acesso.....	25
Figura 7 - Elementos do projeto de drenagem	26
Figura 8 - Elementos importantes na construção do acesso mineiro	26
Figura 9 - Materiais granulares empregados em bases, sub-bases ou reforços	33
Figura 10 - Solos e solo-agregados empregados em bases, sub-bases ou reforços	34
Figura 11 - Defeitos comuns em estradas de mina	38
Figura 12 - Ábaco para a definição do momento a se intervir na estrada através de uma operação de manutenção	39
Figura 13 - Fases dos solos e limites de Atterberg	43
Figura 14 - Gráfico de plasticidade.....	44
Figura 15 - Ábaco da determinação da espessura do pavimento dado pelo CBR	46
Figura 16 - Matriz de requisitos para o Projeto Geométrico	51
Figura 17 - Matriz de requisitos para o Projeto Estrutural	51
Figura 18 - Matriz de requisitos para o Projeto de Drenagem	52
Figura 19 - Matriz de requisitos para a fase de Construção	52
Figura 20 - Diferentes formas de classificação do solo	53
Figura 21 - Diagrama Trilinear ou Triangulares.....	54
Figura 22 - Carta de Plasticidade	55
Figura 23 - Classificação MCT (Nogami e Villibor, 1981)	57
Figura 24 - Metodologia	63
Figura 25 - Organização da análise de conteúdo.....	65
Figura 26 - Complexo Itabira e Complexo Mariana.....	66
Figura 27 – Dimensões do Caminhão CAT 789D	69
Figura 28 – Dimensões Caminhão Komatsu 730E.....	69
Figura 29 - Passos do Método do CBR.....	70

Figura 30 - Determinação da espessura da camada.....	72
Figura 31 – CBR dos acessos.....	77
Figura 32 – Materiais das camadas de base e revestimento	79
Figura 33 - Camadas do pavimento	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência ao rolamento	28
Tabela 2 - Capacidade de suporte de vários materiais	29
Tabela 3 - Materiais de base, sub-base e reforço do subleito mais comumente empregados nos pavimentos do país.....	32
Tabela 4 - Principais defeitos encontrados em estradas de mina	37
Tabela 5 - Correlação das aberturas de peneiras em ASTM e milímetros.....	41
Tabela 6 - Categorias de estradas de mina, segundo Kaufman e Ault (1977), e suas principais características.....	48
Tabela 7 - Categorias de estradas de mina, segundo Thompson e Visser (2008), critérios para a distinção entre classes e descrição sucinta sobre suas características	49
Tabela 8 - Valores limites de deformação vertical no pavimento em função da categoria da estrada. Traduzido de Thompson e Visser (2008).....	50
Tabela 9 - Classificação de estradas de mina, segundo Oliveira Filho et al. (2010b).....	50
Tabela 10 - CBR para alguns tipos de solo.....	61
Tabela 11 - Especificações técnicas CAT 789D e Komatsu 730E	71
Tabela 12 - Ganhos da blindagem de acesso no Complexo Mariana.....	75
Tabela 13 - Resultados do ensaio de CBR	76
Tabela 14 - Resultados de classificação do solo.....	77
Tabela 15- Dimensionamento das camadas do pavimento do Complexo Mariana	80

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

AASTHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte California
LC	Limite de Contração
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MIT	<i>Massachussets Institute of Technology</i>
NBR	Norma Técnica brasileira
NRM	Normas Reguladoras de Mineração
SUCS	Sistema Unificado De Classificação Dos Solos

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	19
RESUMO	22
ABSTRACT	23
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	24
LISTA DE TABELAS.....	26
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS	27
1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVO GERAL.....	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1. CONCEITUAÇÃO DE ESTRADAS	18
3.2. PROJETOS DE ESTRADA DE MINA	18
3.2.1. Projeto geométrico	20
3.2.2. Projetos de pavimentação	21
3.2.2.1. Projetos de pavimentos rígidos	24
3.2.2.2. Projetos de pavimentos flexíveis.....	24
3.2.3. Projeto de drenagem	25
3.3. CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS.....	26
3.3.1. Materiais utilizados para construção das camadas de reforço de subleito, sub-base, base e revestimento.....	31
3.4. MANUTENÇÃO, READEQUAÇÃO E SEGURANÇA	35
3.5. ESTUDOS GEOTÉCNICOS.....	39
3.5.1. Determinação da massa específica real dos grãos	40
3.5.2. Análise Granulométrica Por Peneiramento	40

3.5.3. Análise Granulométrica Por Sedimentação	41
3.5.4. Limites De Consistência	42
3.5.5. Compactação	44
3.5.6. Índice De Suporte California (ISC)	45
3.5.7. Ensaio de abrasão “Los Angeles”	47
3.6. CLASSIFICAÇÃO DE ESTRADAS DE MINA.....	47
3.7. CLASSIFICAÇÃO DE SOLO.....	52
3.7.1. Diagramas Trilineares Ou Triangulares	53
3.7.2. Sistema Unificado De Classificação Dos Solos – SUCS	54
3.7.3. Sistema De Classificação AASHTO	55
3.7.4. Classificação MCT	56
3.8. ESTUDO DE CARREGAMENTO VEICULAR	58
3.9. MÉTODOS DO DNER E MÉTODO DA ASSTHO PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS	58
3.9.1. Métodos empíricos	60
3.9.2. Métodos mecanicistas – empíricos.....	61
4. METODOLOGIA.....	63
5. ESTUDO DE CASO	65
5.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	65
5.2. MATERIAL DE CONSTRUÇÃO DA SUB-BASE, BASE E REVESTIMENTO.....	67
5.3. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO.....	67
5.3.1. Método empírico	68
5.4. CARACTERIZAÇÃO DOS ACESSOS DE MINA DO COMPLEXO MARIANA (SUBLEITO).....	73
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
6.1. ANÁLISE DA BLINDAGEM	75
6.2. ANÁLISE DOS ENSAIOS REALIZADOS	76

6.3. ANÁLISE DOS MATERIAIS	78
6.4. ANÁLISE DO MÉTODO DO CBR	80
6.5. PROPOSTAS DE COMPLEMENTAÇÃO METODOLÓGICA PARA PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO.....	82
7. CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS	87
ANEXOS.....	91

1. INTRODUÇÃO

Os condicionantes quanto à viabilidade de um empreendimento minerário, não estão apenas ligados à existência da reserva mineral, mas também a sua localização em relação aos consumidores e dos fornecedores de insumos necessários à produção do bem mineral, ou seja, ao projeto de rede viária da região da jazida, bem como sua conexão com a rede nacional e portuária (CURI, 2014).

As dimensões e condições das estruturas da lavra estão intimamente relacionados ao tipo de lavra, de modo a oferecer eficiência operacional, economicidade, ocorrendo mudanças nestas estruturas no decorrer da vida útil da mina, sendo compatível com o planejamento e estratégia adotada.

O layout estrutural da mina está intimamente ligado aos equipamentos que transitam sobre eles, ou seja, os parâmetros de construção dos acessos dependem dos equipamentos dimensionados para lavra, levando em consideração: dimensões, *payload* ou carga útil, velocidade, entre outros. As estradas ou acessos de uma mina têm como função permitir a acessibilidade dos equipamentos de transporte, carga e outros ao corpo mineral.

É extremamente relevante a assertividade no dimensionamento das estruturas para circulação dos equipamentos e veículos, para efetividade dos métodos de lavra propostos, assegurando: velocidade média ideal, produtividade, segurança, maior vida útil dos equipamentos em consequência de menores desgastes.

Ao que se refere aos projetos de estradas de mina, o aparato bibliográfico em português é limitado e deficiente, havendo reduzida disponibilidade de pesquisas, estudos e testes desenvolvidos por grupos em iniciativas de trabalho isoladas. Alguns parâmetros que compõe o estudo dos acessos de mina, apoiam-se em parâmetros construtivos de pavimentos rodoviários, que apesar de apresentarem-se distintas quanto ao seus objetivos, possuem certa similaridade, sendo possível encontrar e desenvolver tecnologias de estradas que possam ser adaptadas à mineração, levando em conta as particularidades desses acessos de mina, permitindo conferir-lhes

ganhos de qualidade, segurança e redução de custos, entre outros (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2010).

O projeto estrutural de uma estrada mineira engloba o dimensionamento de um pavimento, que consiste na definição das espessuras e composições das camadas, de forma que tais camadas não se rompam ou se deformem quando sob esforços de cargas atuantes devido ao tráfego de veículos e equipamentos. Os parâmetros construtivos dos acessos devem assegurar condições de rolamento, capeamento adequado, sistema de drenagem eficaz, leiras de segurança.

O dimensionamento do pavimento, parte do projeto estrutural, consiste na determinação das camadas de revestimento, que exercerá papel funcional, e base e sub-base, que exercerá papel estrutural, as quais são projetadas e construídas sob o terreno constituído por material *in situ*, denominado subleito. Tais camadas serão definidas a partir de ensaios de classificação do solo e métodos construtivos.

No Complexo Mariana desenvolveu-se uma técnica para pavimentação das estradas de acesso das minas, nomeada de blindagem. A blindagem baseia-se nos métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos de estradas, especificamente, o método do CBR. O CBR, um dos métodos mais usuais de dimensionamento de pavimento em estradas de mina, baseado no ensaio CBR (*California Bearing Ratio*, correspondente ao Índice de Suporte Califórnia, ISC, em português) e a carga de roda. O método baseia-se na capacidade de suporte das camadas do pavimento, de forma a evitar a ruptura plástica do subleito sob carregamento estático (SOUSA, 2011).

O CBR é um ensaio cujo objetivo principal é determinar a capacidade de suporte de um solo compactado, portanto, vem sendo utilizado no dimensionamento de pavimentos rodoviário na determinação do CBR do subleito e dos materiais das camadas do pavimento, em particular, pavimentos flexíveis, além de permitir a obtenção do índice de expansibilidade do solo, parâmetro relacionado com a durabilidade (DRESCH, 2018).

Posto isso, este estudo teve como objetivo analisar os parâmetros construtivos do procedimento de blindagem das estradas de minas do Complexo Mariana da empresa VALE, tendo em vista a investigação dos

métodos de dimensionamento do projeto de pavimentação das estradas de mina, a partir de pesquisa bibliográfica, e avaliação qualitativa do procedimento padrão atual de blindagem em estradas do complexo, a fim de propor complementações para o projeto de pavimentos de estradas de minas em geral.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Análise do método de dimensionamento de pavimento (blindagem) das estradas de mina do Complexo Mariana-MG da Mineradora Vale.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar os parâmetros construtivos do projeto de pavimentação das estradas de mina;
- Avaliar quali-quantitativamente o projeto de pavimentação padrão atual em estradas de acesso do Complexo Mariana, Vale S.A.;
- Propor metodologias complementares para dimensionamento de pavimento de estradas de mina em geral.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. CONCEITUAÇÃO DE ESTRADAS

Segundo o glossário de termos técnicos rodoviários, estrada é “via de trânsito, em geral em zona não urbana, destinada a veículos rodoviários, animais e pessoa e que não tem as características de estrada de rodagem (rodovia), nem de autoestrada” (DNER ,1997, p. 106). Para Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na norma NBR 10182/98, acessos e vias em minas constituem-se como estradas, levando-se em consideração o tráfego de cargas entre bancadas, as instalações de beneficiamento mineral, as pilhas de estoque de produtos e as pilhas de disposição de estéril.

3.2. PROJETOS DE ESTRADA DE MINA

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

Considerando as adaptações dos projetos construtivos de rodovias as estradas de mina, é importante considerar as duas naturezas dos projetos que envolvem o Projeto de Engenharia Rodoviário: Projeto Básico de Engenharia e Projeto Executivo de Engenharia (DNIT, 2006).

O Projeto Básico de Engenharia tratará das condições mínimas para que seja realizada a licitação da obra, não abrangendo a execução, sendo, portanto, o Projeto Executivo de Engenharia, responsável pela elaboração dos itens do projeto, em especial, ao que se refere aos métodos construtivos, com uma abordagem mais detalhada a respeito da elaboração dos seguintes itens do projeto, conforme representado na Figura 1:

Figura 1 - Etapas de projetos de estradas



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

Sousa (2011, p. 32) ressalta que

"as estradas de mina devem ser projetadas e construídas segundo critérios específicos de caráter geométrico, estrutural, funcional e de drenagem, em conformidade com as legislações ambientais e normas regulamentadoras de saúde e segurança vigentes"

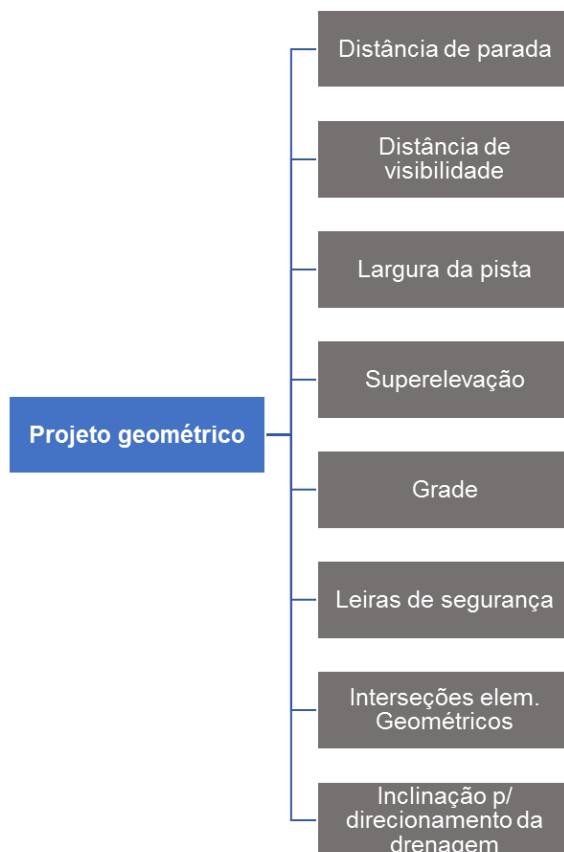
Além de atender tais especificações, os métodos construtivos também buscam a proposição de um sistema que garanta segurança, produtividade, economicidade, viabilidade das operações, sustentabilidade do empreendimento.

Conforme a Normas Reguladoras de Mineração (NRM) nº. 13 que dispõe de requisitos mínimos ao que se refere ao tráfego de equipamentos de transporte em mina, toda mina deve possuir plano de trânsito que estabeleça regras de preferência de movimentação e distâncias mínimas entre máquinas, equipamentos e veículos compatíveis com a segurança e velocidades permitidas, de acordo com as condições das pistas de rolamento; demarcação e sinalização dos limites externos das bancadas; largura mínima das vias de trânsito deve ser duas vezes maior que a largura do maior veículo utilizado; construção de leiras nas laterais das bancadas ou estradas onde houver riscos de quedas de veículos, conforme dimensões dos equipamentos que circulam na via; umidificação de vias de não pavimentadas, onde há circulação de veículos; sinalização luminosa em condições de visibilidade adversa (BRASIL, 2011).

3.2.1. Projeto geométrico

Pontes Filho (1998 apud SOUSA, 2011, p.32) define projeto geométrico como “a correlação entre os elementos físicos de uma estrada e parâmetros operacionais, tais como frenagem, aceleração e características de operação.” Alguns dos elementos mais relevantes para projeto geométrico são (Figura 2): pista de rolamento, distância de parada, distância de visibilidade, largura, superelevação, raio de curvatura, grade, leiras de segurança, interseções entre elementos geométricos, inclinação para direcionamento da drenagem, tais elementos devem estar alinhados às questões técnicas, de segurança e de gestão. Considerando as condições seguras para tráfego dos equipamentos, maior rendimento operacional e produtividade, maior vida útil dos equipamentos, menor emissão de particulados.

Figura 2- Elementos do projeto geométrico de estradas

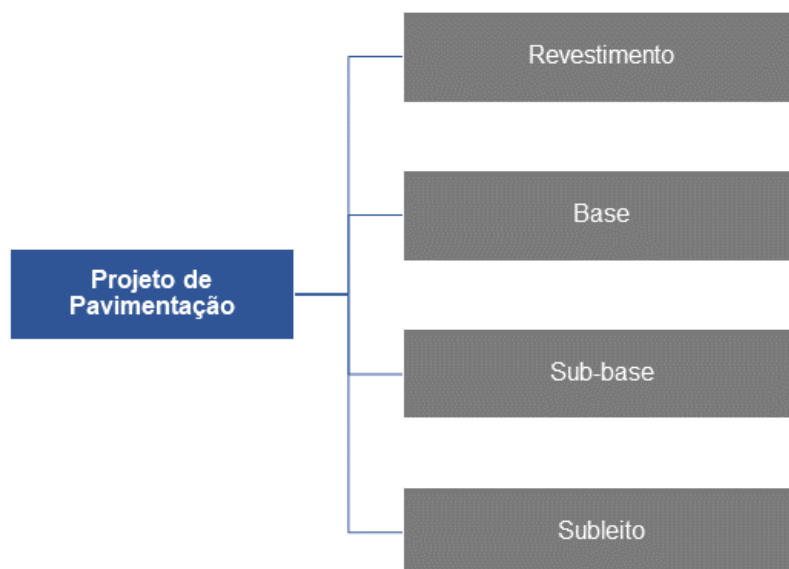


Fonte: Adaptado de MASETTI *et al.* (2011)

3.2.2. Projetos de pavimentação

O projeto estrutural de uma estrada de mineração refere-se à capacidade de suporte de carregamentos impostos à estrada ao longo da sua vida útil, sem que seja necessário recorrer à manutenções excessivas (HUGO, 2005). Reis (2014) ressalta que o projeto de pavimentação (Figura 3) poderá ser compreendido pelo projeto estrutural e projeto funcional, ambos englobam o dimensionamento de um pavimento, de maneira que tais camadas não se rompam ou deformem quando submetidas a esforços de carga devido ao tráfego dos equipamentos. De acordo com Thompson e Visser (2008), o projeto estrutural diz respeito a seleção de materiais e dimensionamento das camadas que possuem função estrutural, conhecidas como: base, sub-base e reforço do subleito. Já o projeto funcional trata da camada de revestimento, aquela que tem caráter funcional.

Figura 3 - Elementos do projeto de pavimentação



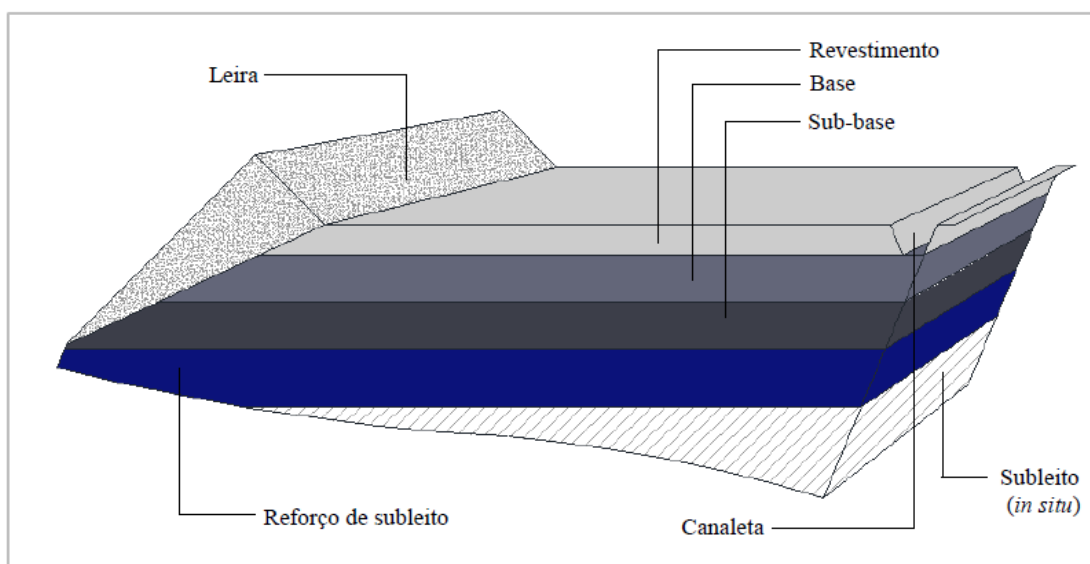
Fonte: Adaptado de MASETTI *et al.* (2011)

Considerando os diferentes esforços sobre as camadas, as características dos materiais das camadas de caráter estrutural e funcional devem ser diferentes. Devido às tensões cisalhantes solicitantes apresentarem-se expressivamente na região da superfície, sendo menores nas camadas

inferiores, nas quais predominam os esforços verticais, vê-se necessária a distinção da capa superior do pavimento, ou seja, do revestimento, em relação as demais camadas. (REIS, 2014).

Segundo Bernucci *et al.* (2007), além das tensões cisalhantes e normais, com o aprofundamento da estrutura, há a atenuação dos esforços de carga sob a superfície do pavimento. Se as tensões compressivas e cisalhantes são maiores na região da superfície do revestimento, o material desta camada deve apresentar resistência à compressão superior a camada inferior a ela, no caso a base, da mesma forma, a base deve ser mais resistente que a sub-base e a partir disso até que se chegue ao subleito. Na Figura 4 tem-se uma representação de uma pavimentação típica onde conforme Oliveira Filho *et al.* (2011):

Figura 4 - Projeto de pavimento de mina



Fonte: SOUSA (2011, p.14)

- revestimento: é a camada de superfície que propicia tração, resistência à ação abrasiva do tráfego e ao cisalhamento, assim como de transmitir o carregamento do pneu para a base, impermeabilizando-a contra a infiltração de água superficial. O revestimento ideal para os projetos de pavimentação deve propiciar o tráfego de equipamentos e veículos em diferentes condições climáticas, redução de particulados em suspensão,

redução de piso escorregadio nos períodos chuvosos, minimização de custos e de manutenções nos acessos;

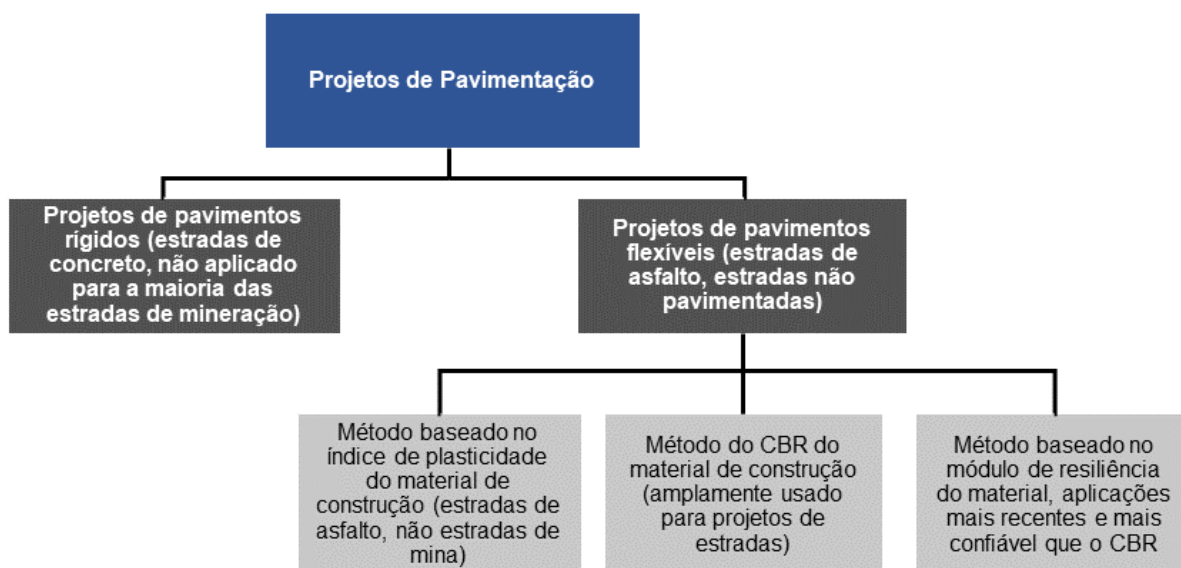
- base: é uma camada com densidade e estabilidade elevadas. O seu papel é distribuir as tensões que surgem devido à atuação dos pneus sob a camada de revestimento, de maneira que tais tensões não deformem excessivamente a sub-base. Ela protege a sub-base de variações volumétricas. A estabilidade da base é primordial, pois caso o pavimento não suporte adequadamente o carregamento imposto pelo tráfego, poderá ser necessário recorrer a manutenção excessiva;
- sub-base: quando considerada no projeto de pavimentação, geralmente é projetada intermediária a base e o subleito, geralmente sob subleitos de solos extremamente incompetentes. A sub-base é normalmente construída por material granular, e propicia a drenagem e proteção do subleito de contrações e expansões, aumentando o suporte estrutural e distribuindo o carregamento;
- subleito: corresponde a camada de fundação, devendo ela suportar todos os carregamentos impostos nas camadas superiores. O subleito pode ser constituído pelo próprio terreno natural (material *in situ*) ou por rocha ou solo compactados.

Em alguns casos há a necessidade de um reforço para o subleito, o qual é definido como

“camada estabilizada granulometricamente, executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário para reduzir espessuras elevadas da sub-base, originadas pela baixa capacidade de suporte do subleito.”(Dresch, 2018, p.69).

Os projetos de pavimentação podem ser de caracterizados como de duas naturezas, conforme representado na Figura 5:

Figura 5 - Diferentes tipos de projetos de pavimentação



Fonte: Adaptado de PERONI (2019?)

3.2.2.1. Projetos de pavimentos rígidos

O Manual de Pavimentos define pavimentos rígidos como, aqueles cujos revestimentos apresentam rigidez elevada em comparação às camadas inferiores, desta forma absorvendo todas as tensões oriundas do carregamento imposto. Exemplo deste tipo de revestimento são os pavimentos constituídos por lajes de concreto de cimento Portland (DNIT, 2006).

3.2.2.2. Projetos de pavimentos flexíveis

O pavimento flexível é assim caracterizado, devido a todas as camadas sofrerem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado, e, portanto, há uma distribuição de tensões em parcelas equivalentes entre as camadas. Como exemplo de pavimento flexível típico, podemos citar: pavimento constituído por uma base de brita (graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, em certos casos, revestida por uma camada de asfalto (DNIT, 2006).

3.2.3. Projeto de drenagem

Nas vias de acesso temos normalmente a interceptação de águas pluviais e águas subterrâneas. A drenagem de uma estrada tem como principal função, eliminar a água que atinge seu pavimento, captando-a e direcionando-a para locais em que tenha menor impacto à que diz respeito a segurança e durabilidade da via, de maneira que essa ação não provoque danos ao meio ambiente (erosões). A elaboração e execução de um bom sistema de drenagem é essencial para uma estrada de mina, a fim de garantir condições seguras de tráfego, condições estruturais que exijam menor quantidade de reparos e manutenções nestes acessos (MSETTI *et al.*, 2011).

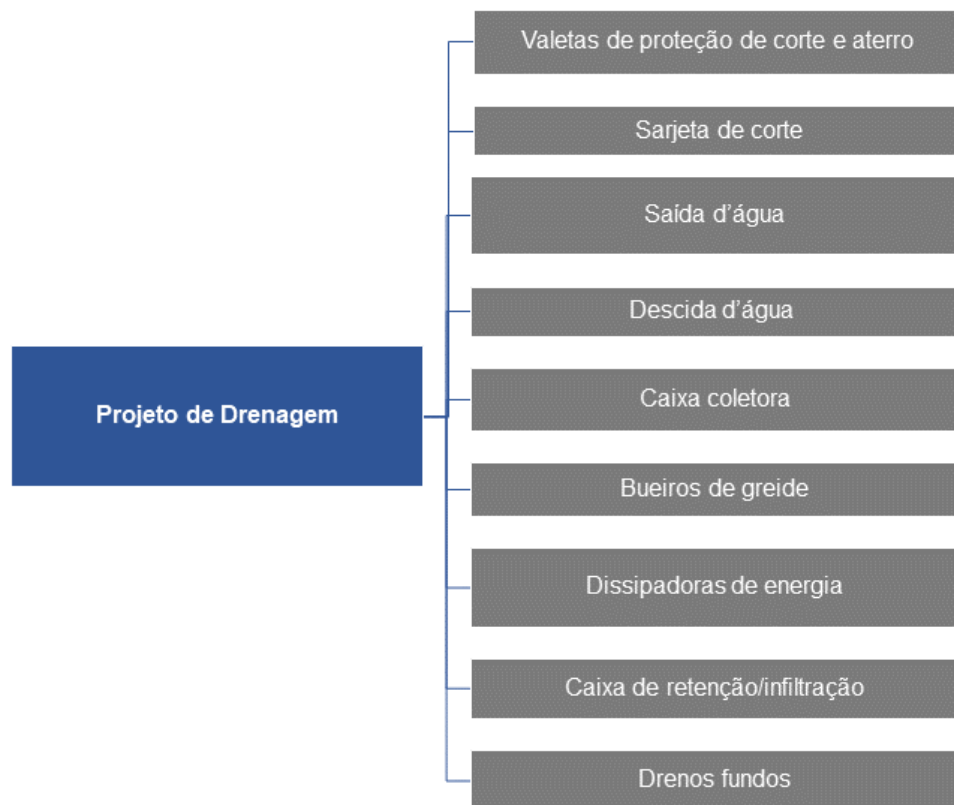
O objeto do sistema de drenagem (Figura 6 e Figura 7) é “evitar que os materiais de construção do pavimento e do subleito sofram grandes variações de teor de umidade e, conseqüentemente, de volume e de capacidade de suporte, durante o período de serviço” (DNIT, 2006, p. 95).

Figura 6 - Importância da drenagem superficial de vias de acesso



Fonte: MASETTI *et al.* (2011)

Figura 7 - Elementos do projeto de drenagem

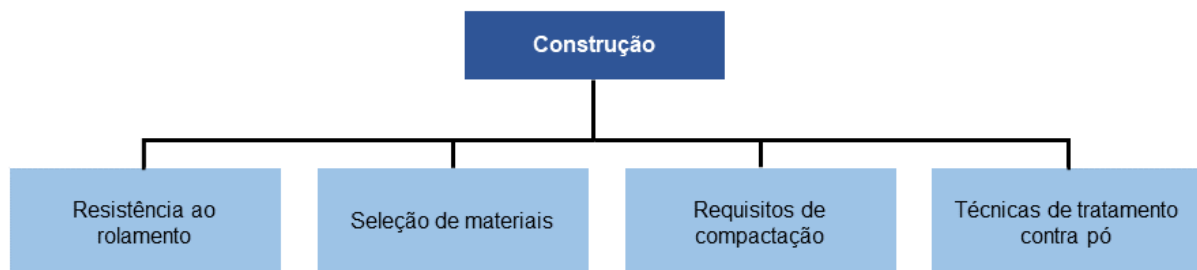


Fonte: Adaptado de MASETTI *et al.* (2011)

3.3. CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS

A construção de estradas envolve algumas etapas fundamentais para garantir qualidade e funcionalidade das vias (Figura 8):

Figura 8 - Elementos importantes na construção do acesso mineiro



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

A construção de um pavimento além de ter como principal objetivo, fornecer ao usuário uma boa qualidade de uso, ele deve também oferecer um grau de segurança necessário para atender alguns requisitos básicos, como suportar os efeitos do mau tempo, permitir deslocamento suave, não causar desgaste excessivo dos pneus e alto nível de ruídos, ter estrutura forte, resistir ao desgaste de uso, permitir o escoamento das águas e ter boa resistência a derrapagens (DRESCH, 2018).

A avaliação da resistência ao rolamento é primordial na construção de um pavimento, objetivando a seleção do material mais adequado para constituir as camadas, visto que alterações na camada de revestimento provocam alterações no índice de resistência. Além da escolha do material, a compactação das camadas que compõe a estrada, também contribui para o aumento da rigidez e resistência do material. Outro item importante é o tratamento para emissão de particulados da camada de revestimento, que a depender da intensidade, pode provocar alteração nas condições do tráfego, nas questões relativas à segurança e saúde ocupacional dos trabalhadores, além, de em alguns casos, afetar as comunidades circunvizinhas ao empreendimento (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2010)

Masetti *et al.* (2011, p.89) propõe duas definições para resistência ao rolamento:

“[...] medida da força a ser superada para que uma roda seja puxada ou rolada sobre o solo. Essa força é afetada por condições do solo e pela carga: quanto mais uma roda afunda no solo, maior a resistência ao rolamento, [...] capacidade de um pneu resistir ao seu movimento natural de "girar" (ou rolar). Quanto menor a resistência ao rolamento de um pneu, menos energia será necessária para fazê-lo "girar", resultando em economia de combustível e por consequência, menor emissão de poluentes na atmosfera. A resistência ao rolamento somente se aproximará do ideal em superfícies muito duras, lisas, com uma base bem compactada” (MASETTI *et al.*, 2011, p.89).

A resistência ao rolamento pode ser estimada e alguns de seus valores típicos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resistência ao rolamento

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

Fonte: Adaptado de CATERPILLAR (2000)

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

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

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

Tabela 2 - Capacidade de suporte de vários materiais

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

Fonte: Adaptado de TANNANT & REGENSBURG (2001)

Segundo as normas técnicas do DNIT (2006), a execução de cortes e aterros, pode ser compreendida por escavação, carregamento, transporte, descarga e espalhamento, compactação, dentro do termo terraplenagem. Dentre elas, destaca-se a compactação, que por meio da aplicação de

pressão, vibração ou impacto, aumenta o peso específico do solo. A compactação também exercerá influência sob a vida útil da pista de rolamento, quanto maior a compactação, menor a deformação do material de pavimentação e maior a resistência. Os equipamentos geralmente empregados para compactação são: rolo pé-de-carneiro, rolo de pneu, rolo vibratório liso e/ou corrugado.

Conforme o Manual de Estrada de Mina,

“independentemente do material utilizado, a sub-base, a base e o revestimento devem ser compactados em camadas que não excedam 20 cm de espessura [...] Para a compactação de cada 20 cm de camada são necessárias repetidas passadas até que o material não seja mais comprimido sob o peso do rolo” (Kaufman & Ault, 1977 apud MASETTI *et al.*, 2011, p. 98).

O tráfego de equipamentos nas estradas de mina pode causar a geração excessiva de partículas em suspensão, ou seja, poeira, vindo a afetar a visibilidade na pista, qualidade do ar, além de manutenções excessivas de equipamentos, devido penetração de partículas nos componentes mecânicos, podendo reduzir a vida útil deles.

Um das formas mais simples para controle da poeira, principalmente nas estações mais secas, é a umidificação dos acessos, aspergindo água por meio de caminhões pipas. A água ajuda a manter a compactação e a resistência da camada superficial, mantendo também a sua forma e reduzindo a perda de material inconsolidado. Sistemas de aspersão fixa dispostos ao longo das leiras de segurança são também utilizados em algumas situações (SOUSA, 2011).

A depender do resultado desta aspersão somente com água, em algumas situações, utiliza-se de líquidos estabilizadores e polímeros biodegradáveis, para aumentar a efetividade deste tipo de controle de particulado. O princípio fundamental do controle de particulados em estrada de terra é oferecer ao revestimento maior coesão e impermeabilidade, desta forma, mais do que a redução de poeira em ocasiões de clima seco, poderá se reduzir também a formação de lama em períodos chuvosos, contribuindo para a melhor trafegabilidade do trecho e diminuindo consideravelmente o número de intervenções. (MASETTI *et al.*, 2011).

3.3.1. Materiais utilizados para construção das camadas de reforço de subleito, sub-base, base e revestimento

O dimensionamento adequado de uma estrutura de pavimentação, deve envolver informações que possibilitem conhecer bem as propriedades dos materiais de composição do pavimento, assim como o comportamento de cada qual, como resistência a ruptura, permeabilidade e deformabilidade, sob à repetição de carga e as condições climáticas. A realização de ensaios em materiais é essencial para seleção e caracterização de suas propriedades (DRESCH, 2018).

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), os materiais constituintes das camadas de base, sub-base e reforço do subleito, são também classificados segundo seu comportamento frente aos esforços em: materiais granulares¹ e solos, materiais cimentados², e materiais asfálticos (Tabela 3). Comumente a camada de base é constituída por material mais grosso e a sub-base de material arenoso ou siltoso.

¹ “Entende-se por materiais granulares aqueles que não possuem coesão (a não ser aparente pela sucção) e que não resistem à tração, trabalhando eminentemente aos esforços de compressão. Os solos coesivos resistem à compressão, principalmente, e também à tração de pequena magnitude, graças à coesão dada pela fração fina” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.352).

Tabela 3 - Materiais de base, sub-base e reforço do subleito mais comumente empregados nos pavimentos do país

Classe	Materiais
Granulares e solos	brita graduada simples (BGS) e bica ou brita corrida; macadame hidráulico; macadame a seco; misturas estabilizadas granulometricamente (estabilizadas por combinação de materiais para atender certos requisitos ou mecanicamente); solo-agregado; solo natural; solo melhorado com cimento ou cal.
Cimentados	brita graduada tratada com cimento (BGTC); solo-cimento; solo-cal; solo-cal-cimento; concreto rolado (CCR – concreto compactado a rolo).
Asfálticas	solo-asfalto; solo-emulsão; macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado.

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

As figuras Figura 9 e Figura 10 apresentam os principais materiais granulares, solos e solo-agregados empregados em bases, sub-bases ou reforços de subleito.

Figura 9 - Materiais granulares empregados em bases, sub-bases ou reforços



a) Brita graduada simples



(b) Bica corrida



(c) Rachão



(d) Macadame hidráulico



(e) Macadame seco



(e) Macadame seco: detalhe da graduação

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

Figura 10 - Solos e solo-agregados empregados em bases, sub-bases ou reforços



(a) Solo-brita descontínuo: mistura em pista



(b) Solo-brita descontínuo: detalhe da camada compactada



(c) Solo-brita



(f) Solo-areia: mistura em pista



(e) Argila arenosa laterítica LG': trincas devido à perda de umidade da camada compactada



(d) Solo arenoso fino laterítico LA': trincas devido à perda de umidade da camada compactada

Fonte: BERNUCCI *et al.* (2010)

A escolha do revestimento além de levar em consideração os requisitos gerais deve também considerar certos fatores operacionais aos quais somente o revestimento é submetido, como controle de poeira, suavidade ao tráfego, aderência e resistência ao rolamento. Para essa camada é exigida a utilização do melhor material disponível, já que ela recebe as ações de desgaste e as maiores cargas dinâmicas causadas pelo tráfego dos veículos, sendo geralmente usados solos cascalhados naturais e rochas britada, dado que esses apresentam baixa resistência ao rolamento e elevada aderência, garantindo assim a máxima segurança e eficiência operacional (SOUSA, 2011).

“De forma geral, os materiais granulares são bem empregados na construção de estradas de mina, tanto como materiais de revestimento quanto de base. Possuem como vantagem custos de construção e manutenção relativamente baixos e propiciam estradas relativamente lisas e estáveis, que resistem à deformação sob carregamento e permitem boa tração e elevada aderência com baixa resistência ao rolamento” (MASETTI et al, 2011, p.94).

3.4. MANUTENÇÃO, READEQUAÇÃO E SEGURANÇA

O pavimento de uma estrada deve ser concebido, projetado, construído e conservado a fim de apresentar níveis de desempenho ou serventia desejáveis, sendo as características gerais de desempenho avaliadas por três aspectos: segurança, conforto e economia (de manutenção, operação e segurança). Para que se alcancem os níveis de desempenho desejados para a estrada é fundamental o funcionamento efetivo, solidário e harmônico de seus componentes (pavimento, leiras de segurança, obras de proteção de corpo estradal, drenagem superficial e profunda, sinalização, obras complementares, sinalização entre outros). Consequentemente a manutenção do pavimento consistente de operações que se desenvolvem com o objetivo de manter ou elevar os níveis de segurança, conforto e economia dos pavimentos, considerando todos os seus aspectos (DNIT, 2006).

MASETTI et al. (2011, p.106) ressalta:

“As condições da superfície de uma estrada de acesso influenciam diretamente nos parâmetros de segurança, qualidade e custos de manutenção dos caminhões (consumo de combustível e lubrificantes, desgaste dos pneus etc.). Salienta-se que quanto melhor uma estrada tenha sido construída, menor será a taxa de deterioração da

mesma e consequentemente a necessidade de frequência de manutenção será mais baixa” (MASETTI *et al.*, 2011, p.106).

O Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), apresenta algumas definições relativas ao que se refere às principais atividades típicas de conservação de pavimentos, como: conservação preventiva periódica, conservação corretiva rotineira, remendos, reforço estrutural, restauração, melhorias e ações emergenciais.

A identificação dos tipos de defeitos e imperfeições existentes nas estradas de mina são primordiais para a definição do tipo de tratativa conforme a necessidade, bem como a frequência das manutenções, além da execução de readequações nos acessos de mina, o tempo de vida útil do acesso, e a intensidade do tráfego nas áreas avaliadas, também devem ser considerados na tomada de decisões quanto as manutenções e readequações. As diretrizes estabelecidas nos projetos geométrico, de pavimentação e drenagem e na construção, devem ser aplicadas, sempre que possível. (MASETTI *et al.*, 2011)

A Tabela 4 e a Figura 11, apresentam os defeitos mais comuns nas estradas de mina, segundo Masetti *et al.* (2011) e Reis (2014).

Tabela 4 - Principais defeitos encontrados em estradas de mina

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

Fonte: Adaptado REIS (2014)

Figura 11 - Defeitos comuns em estradas de mina

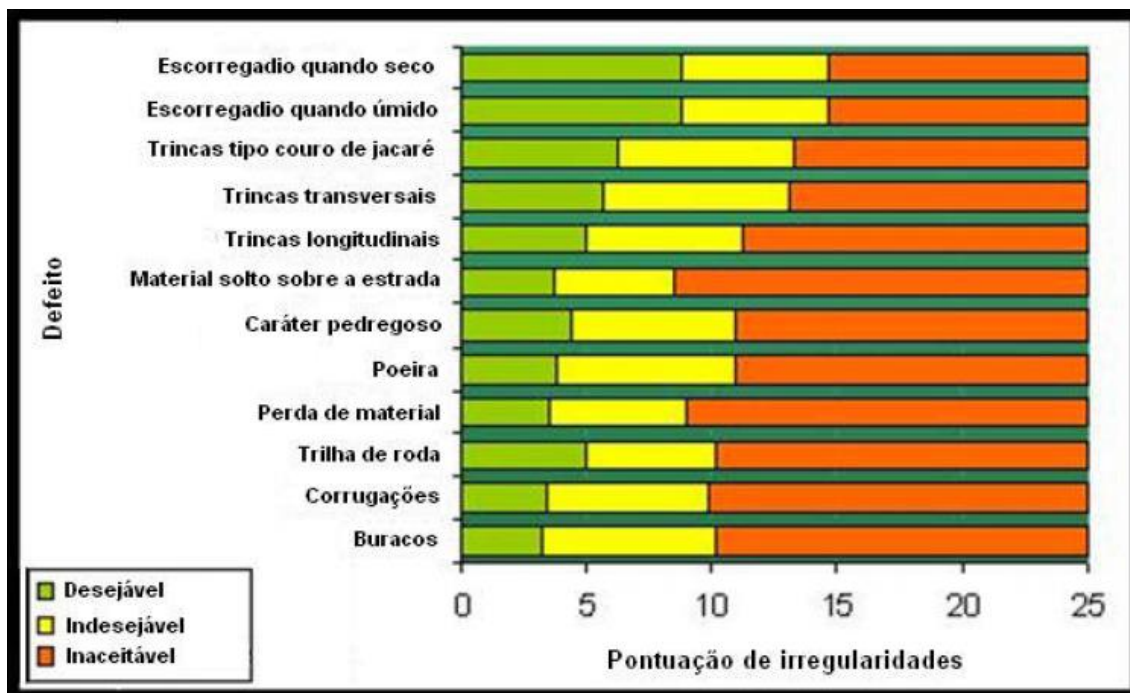


Fonte: MASETTI *et al.* (2011)

Reis (2014) ressalta que, apesar dos defeitos apresentados na Figura 11 estarem diretamente ligados ao pavimento, a manutenção também abrange os elementos de drenagem, dispositivos de segurança, ou qualquer outro componente estrutural que interaja com a estrada, tanto para fim corretivo quanto para preventivo de possíveis defeitos.

O Sistema de Gerenciamento de Manutenção criado por Thompson e Visser (1999) permite uma estimativa da resistência ao rolamento, assim como a programação de manutenções em intervalos apropriados, através da observação dos defeitos em estradas de mina. A Figura 12 apresenta um ábaco que objetiva definir o momento de intervenção, segundo a faixa (verde, amarela ou laranja) definida pela pontuação de defeitos:

Figura 12 - Ábaco para a definição do momento a se intervir na estrada através de uma operação de manutenção



Fonte: REIS (2014) traduzido de THOMPSON E VISSER (2008)

3.5. ESTUDOS GEOTÉCNICOS

O Projeto de Pavimentação é compreendido de estudos geotécnicos que envolvem o estudo do subleito e o estudo de ocorrência de materiais para pavimentação. O estudo do subleito de estradas objetiva a partir da identificação do solo a caracterização das diversas camadas e posterior traçado dos perfis do solo para definição do projeto de pavimentação. Já o estudo de ocorrência de materiais para pavimentação busca o reconhecimento e caracterização de materiais de jazidas como fonte de matéria-prima para construção das diversas camadas de reforço de subleito, sub-base, base e revestimento, conforme projeto de pavimentação. Os estudos geotécnicos envolvem os seguintes ensaios (DNIT, 2006):

- granulometria por peneiramento com lavagem de material na peneira de 2,0 mm (10# ou peneira nº 10 da ASTM) e de 0,075mm (200# ou peneira nº 200 da ASTM);

- limite de liquidez;
- limite de plasticidade;
- limite de construção em casos especiais de materiais de subleito;
- compactação;
- massa específica aparente “*in situ*”;
- Índice de Suporte California (ISC);
- expansibilidade no caso de solos lateríticos.

3.5.1. Determinação da massa específica real dos grãos

O peso específico dos grãos corresponde a relação entre o peso e o volume de uma partícula individual de solo, desprezando os vazios existentes no solo. O peso específico pode ser definido por meio da Equação 1, onde P_s corresponde ao peso seco e V_s ao volume de grãos.

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} \quad (1)$$

Em laboratório o peso específico é obtido por meio de picnômetro, é necessário conhecer o volume ocupado pelos grãos, o que é possível com base no princípio de que “[...] um corpo imerso em água desloca um certo volume de líquido. Esse volume é obtido diretamente, através de uma relação de peso com a água deslocada” (REINERT *et al.*, 2016, p. 13).

3.5.2. Análise Granulométrica Por Peneiramento

“A análise granulométrica consiste na determinação das porcentagens, em peso, das diferentes frações constituintes da fase sólida do solo” (DNIT, 2006, p.31). Para grãos de solo superiores a 0,075 mm(200#) o ensaio é realizado peneirando a amostra de solo por uma série de peneiras entre 10# e 200#, de malhas quadradas e dimensões padronizadas. O retido em cada uma das peneiras é pesado e calculam-se as porcentagens de passantes em cada peneira. As peneiras normais da ASTM mais usadas estão representadas na Tabela 5:

Tabela 5 - Correlação das aberturas de peneiras em ASTM e milímetros

Nº	Abertura (mm)
200	0,075
100	0,15
40	0,42
10	2,09
4	4,8

Fonte: DNIT (2006)

3.5.3. Análise Granulométrica Por Sedimentação

A determinação da granulometria por sedimentação é feita para obter o diâmetro das partículas de solo inferiores a 0,075 mm, utilizando-se o método de sedimentação contínua em meio líquido. Este método baseia-se na Lei de Stokes, a qual relaciona o diâmetro das partículas (Equação 2) com sua velocidade de sedimentação em um meio líquido de viscosidade e peso específico conhecidos (DNIT, 2006).

$$d = \sqrt{\frac{1800n}{\gamma_g - \gamma_a} \times \frac{a}{t}} \quad (2)$$

Onde:

d = diâmetro equivalente da partícula, isto é, o diâmetro de uma esfera de mesmo peso específico e que sedimenta com a mesma velocidade;

γ = peso específico das partículas de solo;

n = coeficiente de viscosidade do meio dispersor;

a = altura de queda das partículas, correspondente a leitura do densímetro;

t = tempo de sedimentação

A porcentagem de material não sedimentado é dada pela Equação 3:

$$Q = \alpha \times \frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1} \times \frac{L_c}{P_s} \quad (3)$$

onde:

Q = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro

α = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0mm (peneira nº10);
 L_c = leitura corrigida do densímetro ($L_c = L + \Delta L$; em que L é a decimal da leitura na parte superior do menisco multiplicado por 103 e ΔL a correção);
 P_s = peso de solo seco usado na suspensão.

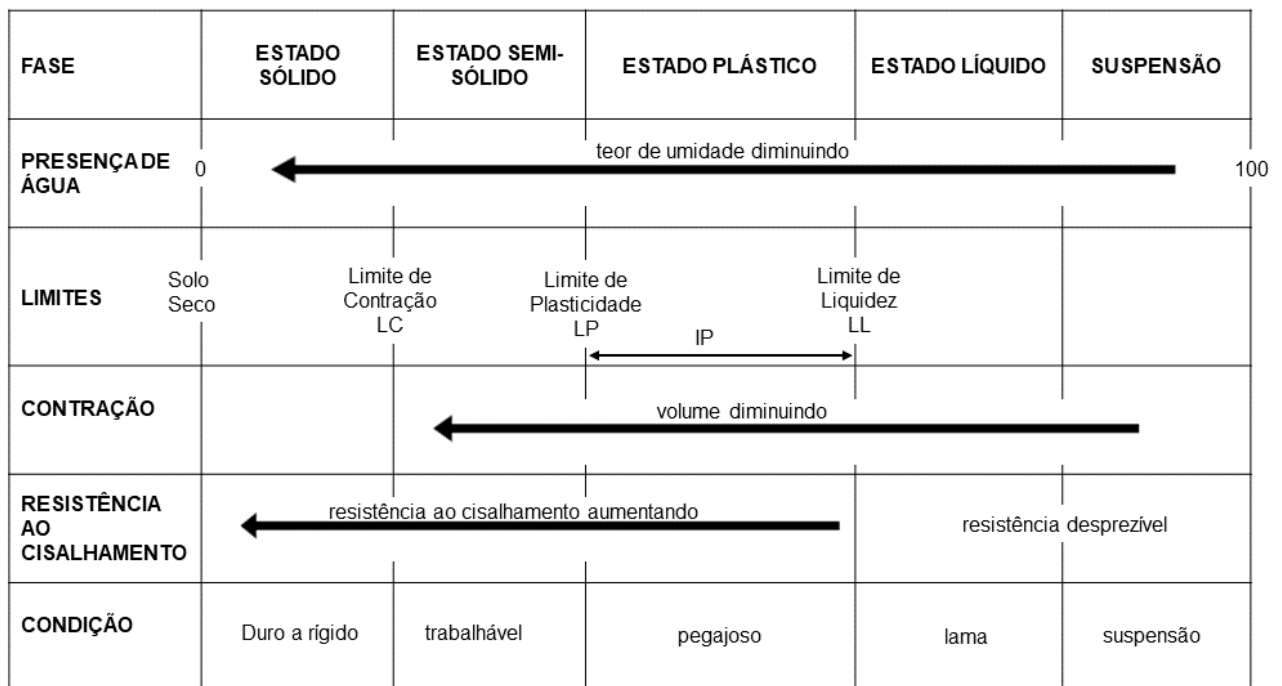
A curva granulométrica da amostra, é gerada a partir dos resultados obtidos nos ensaios de peneiramento e sedimentação, traçando-se em um diagrama semi-logarítmico, cuja abcissa são os logaritmos das dimensões das partículas e as ordenadas são as porcentagens de material passantes. A partir desta curva granulométrica é possível distinguir os diferentes tipos de granulometrias: uniforme, bem graduada, mal graduada (DNIT, 2006).

3.5.4. Limites De Consistência

Um solo pode ser dito em estado líquido quando sua umidade é muito alta, apresentando-se então como um fluido denso, à medida que ele perde água, por evaporação, ele endurece, transitando do estado líquido para o estado plástico. O limite de liquidez equivale ao teor de umidade correspondente à fronteira entre os estados líquido e plástico. Continuando a perda de umidade, o estado plástico desaparece, a amostra começa a desagregar-se ao ser manipulada, já se apresentando no estado semi-sólido. O teor de umidade correspondente ao ponto de transição entre os estados plástico e sólido é chamado limite de plasticidade. Caso o solo continue a perder umidade, ele passa do estado semi-sólido para o estado sólido, sendo o limite entre estes dois estados denominado limite de contração. Esses parâmetros também são conhecidos como limites de Atterberg (DAS *et al.*, 2019).

A Figura 13 apresenta as fases dos solos e limites de Atterberg:

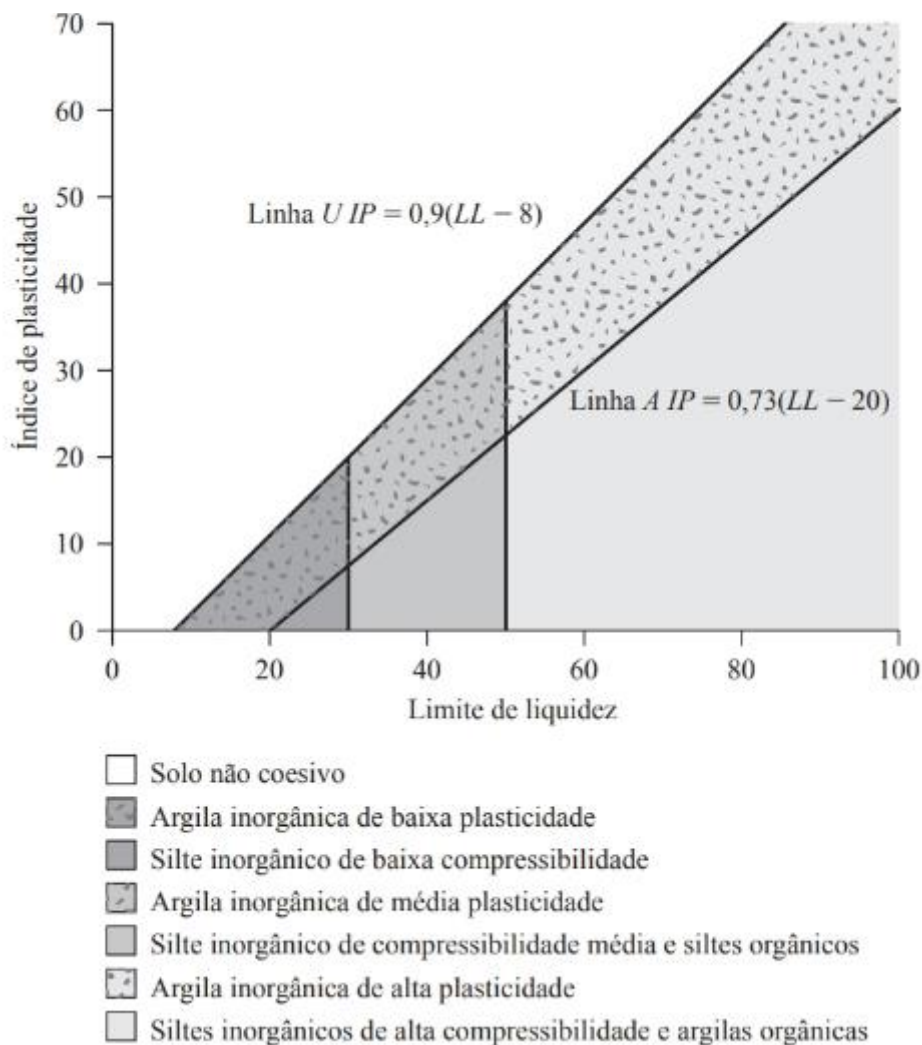
Figura 13 - Fases dos solos e limites de Atterberg



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA FILHO (Notas de aula, 2021)

O índice de plasticidade (IP) é a diferença numérica entre os limites de liquidez e plasticidade, ele permite a avaliação do caráter argiloso do solo, pois quanto maior o IP, mais plástico e, portanto, mais argiloso será o solo, e quanto menor o valor de IP, mais arenoso o solo. O índice de plasticidade reflete a quantidade de argilo minerais presente no solo, e os limites de liquidez e plasticidade atribuem-se a quantificação e qualificação da argila, podendo também indicar o teor de umidade (DRENCH, 2018). A Figura 14 apresenta o gráfico de plasticidade.

Figura 14 - Gráfico de plasticidade



Fonte: DAS *et al.* (2019)

3.5.5. Compactação

A compactação consiste na aplicação de pressão, impacto ou pressão sob o solo, reduzindo os índices de vazios e aumentando o contato entre as partículas, resultando no aumento da massa específica aparente e a resistência de um solo. Na década de 30, Proctor e Porter definiram os princípios que regem a compactação de solos, vindo Proctor a desenvolver o ensaio de compactação, conhecido como ensaio de Proctor Normal ou como *A.A.S.H.O Standard*, foi normalizado pela *American Association of State Highway Officials* (AASHO) e no Brasil foi normalizado pela ABNT/NBR 7182/86, padronizado pelo DNER-ME 129/94.

O ensaio mais comum é o de Proctor (Normal, Intermediário ou Modificado), que é realizado através de sucessivos impactos de soquete padronizado na amostra, através dele é possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo quando compactado com determinada energia. No Brasil, este ensaio é normatizado pelas normas ABNT NBR-7182/2016 e DNERM162/94. (DAS *et al.*, 2019).

3.5.6. Índice De Suporte California (ISC)

O ensaio de Índice de Suporte California (ISC), também chamado de ensaio CBR, desenvolvido em 1939 pelo engenheiro O. J. Porter, tem como principal objetivo determinar capacidade de suporte de um solo compactado, integrando-se no dimensionamento de pavimentos rodoviário. O ensaio CBR também permite definir o índice de expansibilidade do solo sob um pavimento quando este estiver saturado e fornece indicações da perda de resistência do solo com a saturação, apesar de ter um caráter empírico, o CBR é a principal base para o dimensionamento de pavimentos flexíveis (DAS *et al.*, 2019).

O CBR é calculado pela razão percentual entre a pressão exercida pelo pistão, em condições semelhantes, em uma amostra de brita bem graduada de alta qualidade com CBR=100%, o valor desta relação, permite determinar, por meio de métodos empíricos, a espessura de pavimento flexível necessária, em função do tráfego (DAS *et al.*, 2019). O CBR pode ser calculado através da Equação 4.

$$\text{CBR}(\%) = \frac{\text{Pressão encontrada}}{\text{Pressão padrão}} \times 100 \quad (4)$$

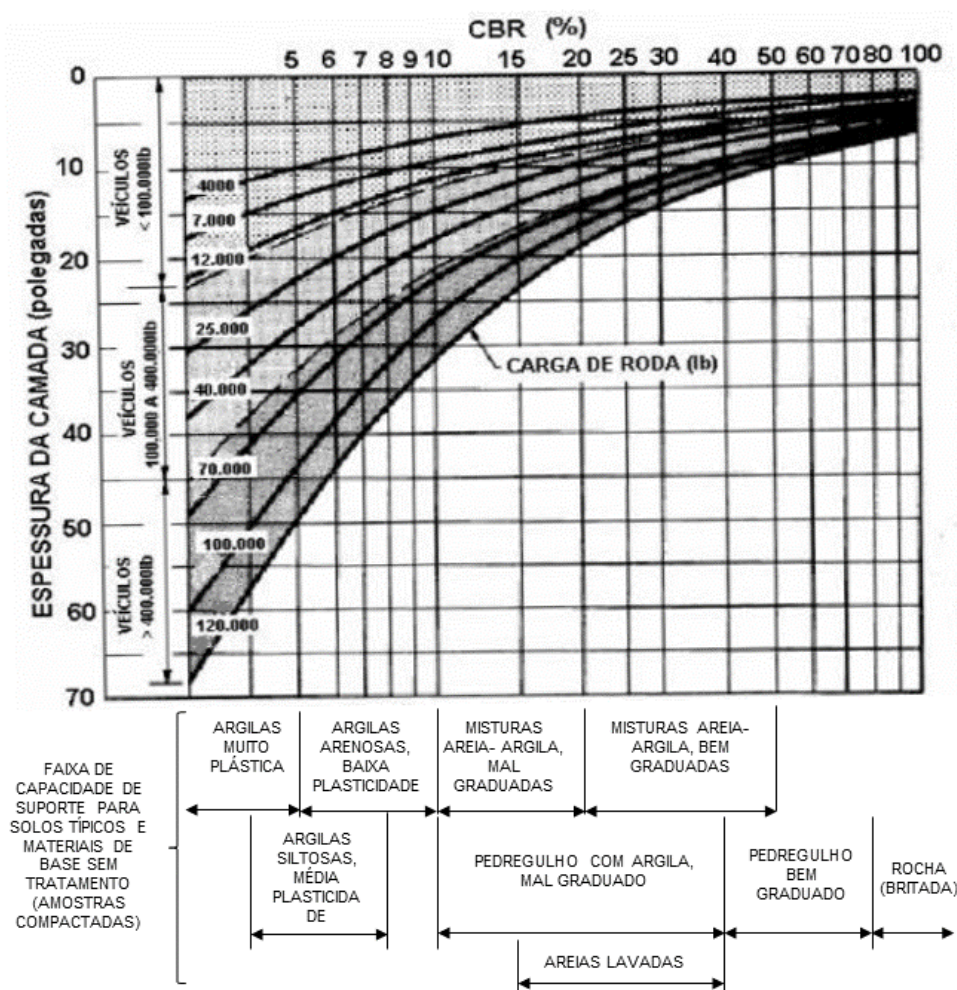
O DNIT (2006) recomenda a seguinte classificação para o emprego de materiais nas camadas dos pavimentos:

- subleito: CBR $\geq 2\%$ e expansão $\leq 2\%$;
- reforço de subleito: CBR maior que o do subleito e expansão $\leq 1\%$;
- sub-base: CBR $\geq 20\%$ e expansão $\leq 1\%$;
- base: CBR $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$.

“[...]no dimensionamento tradicional de pavimentos são consideradas as características geotécnicas dos materiais a serem usados, em que a definição da espessura das várias camadas depende do valor da CBR e do mínimo de solicitação de um eixo-padrão (8,2 toneladas). No caso do subleito, que é a camada ao qual se leva em conta, primeiramente, o valor de CBR para o dimensionamento das demais camadas, se o CBR do subleito for $< 2\%$, ele deve ser substituído por um material melhor ($2\% \leq \text{CBR} \leq 20\%$) até pelo menos 1,00 metro. Já, se o CBR do material do subleito for $\geq 20\%$ pode ser usado como sub-base” (DAS *et al.*, 2019).

A Figura 15 apresenta o ábaco do CBR que é comumente utilizado no dimensionamento de pavimento.

Figura 15 - Ábaco da determinação da espessura do pavimento dado pelo CBR



Fonte: OLIVEIRA *et al.* (2010)

Diferente dos valores de CBR, os índices de expansão não afetam diretamente no dimensionamento de pisos e pavimentos. No entanto, a sua

avaliação é imprescindível, pois um solo expansivo poderá provocar manifestações patológicas irreparáveis (DRESCH, 2018, p. 60).

3.5.7. Ensaio de abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão *Los Angeles* (NBR NM 51/2001) para agregados destinados à pavimentação foi desenvolvido para avaliar a resistência a abrasão dos agregados graúdos e miúdos, ou seja, a capacidade do agregado não se alterar(quebrar) quando manuseado. A abrasão pode ser definida como desgaste superficial dos grãos do agregado quando sofrem atrição, e a quebra está relacionada com fratura e perda de massa, quando há perda da textura superficial e de angularidade, além da perda da resistência à deformação permanente das misturas compostas por eles (GUERRA, 2013).

3.6. CLASSIFICAÇÃO DE ESTRADAS DE MINA

Considerando os vários parâmetros envolvidos nos projetos, construção e manutenção de estradas, a busca pela otimização deles, considerando as demandas, performances desejadas e a capacidade de suporte aos esforços a serem empregados sob as estradas sucedem-se as classificações de estradas, que inicialmente, por meio do agrupamento de estradas com características semelhantes em uma mesma classe, busca definir características em função da classe definida, chegando a indicar limites ou intervalo de valores, em alguns casos.

Reis (2014) apresenta alguns sistemas de classificação de estrada de mina, desenvolvidas e/ou citadas por Kaufman e Ault (1977), Tannant e Regensburg (2001), Thompson e Visser (2008) e Oliveira Filho *et al.* (2010b).

Kaufman e Ault (1977) sugeriram um sistema de classificação baseado no porte e no peso bruto do equipamento que trafega sob a via. A partir destas características, Kaufman e Ault (1977) propuseram quatro categorias de faixas de peso, definindo para cada uma delas: distância de parada, em curvas em função da velocidade, o controle vertical, as larguras de estradas, a

superlargura em curvas e o espaçamento entre leiras, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Categorias de estradas de mina, segundo Kaufman e Ault (1977), e suas principais características

Categoria	Faixa de peso (t)	Máxima distância de parada, em metros, a 32,2 km/h	Greide máximo (%)	Largura mínima das Estradas de pista dupla em trechos em curva, em metros, para um raio de curvatura de 30,5 m
1	< 45,36	18,3	10	12,8
2	De 45,36 a 90,72	27,4		15,5
3	De 90,72 a 181,44	38,1		21
4	> 181,44	53,3		31,4

Fonte: REIS (2014)

Para Reis (2014), o sistema de classificação proposto por Kaufman e Ault (1977) não é suficiente, pois refere-se apenas às características geométricas da estrada e solicitações, o que é essencial, no entanto existem outros parâmetros que podem interferir nas características de uma estrada, sendo necessário à definição dos esforços aos quais ela estará submetida.

Dois sistemas de classificação comuns em empreendimentos minerários, são propostos por Tannant e Regensburg (2001). O primeiro classifica as estradas em duas diferentes classes: primária ou permanente, que são aquelas com vida útil superior a seis meses; e auxiliar ou temporária, que podem ser caracterizadas como acessos para exploração, circulação dentro da cava ou como acesso a cava. O segundo sistema classifica as estradas de mina por meio dos seguintes parâmetros: estradas de longa vida útil, estradas de acesso à cava e estradas dentro da cava (*“in-pit”*) (REIS, 2014).

Já o sistema de classificação proposto por Thompson e Visser (2008), classifica as estradas segundo volume de tráfego, tipo de veículo, permanência (tempo de vida útil) e níveis de desempenho ou de serviço. A Tabela 7 apresenta a classificação proposta com base nos parâmetros de classificação, onde VDMax refere-se ao volume de tráfego diário máximo (em 103 toneladas transportada), Tt corresponde ao o tipo de tráfego, ou o peso bruto máximo

permitido para um veículo que trafegue pela via (em toneladas) e o IDR é o índice de desempenho requerido.

Tabela 7 - Categorias de estradas de mina, segundo Thompson e Visser (2008), critérios para a distinção entre classes e descrição sucinta sobre suas características

Categoria	VDMax	Tt	IDR³	Descrição
Categoria I	> 80	376	3	Permanente e alto volume de tráfego nas principais estradas de transporte ex-pit a partir de rampas (em de disposição final de estéreis. Tempo de operação de pelo menos 20 anos.
Categoria II	De 30 a 80	376	2	Semi-permanentes e alto volume de tráfego em rampa, em cava. Tempo de operação de 5 a 8 anos.
Categoria III	< 30	288	1	Semi-permanente e médio a baixo volume de tráfego, in-pit nos acessos a bancadas ou, ex-pit, nas estradas de acesso aos sistemas de disposição final de estéreis. Tempo de operação menor que 2 anos.

Fonte: REIS (2014)

Além de classificar segundo as características geométricas, Thompson e Visser (2008) propõem também uma classificação relacionada ao projeto de pavimentação, já que ambos estão diretamente ligados a categoria de estrada, a deformação vertical máxima admissível e o volume de tráfego na via, conforme demonstrado na Tabela 8.

³ 1-Adequado no curto prazo, porém necessita de manutenção intensiva uma vez ultrapassada a vida de projeto; 2- Bom, com intervenções normais de manutenção ao longo da vida de projeto; 3- Excelente, com baixos requisitos de manutenção ao longo da vida de projeto.

Tabela 8 - Valores limites de deformação vertical no pavimento em função da categoria da estrada. Traduzido de Thompson e Visser (2008)

Categoria	Faixa de valores limites de deformações verticais ($\mu\epsilon$)	
	Volume de tráfego > 100.000 t/dia	Volume de tráfego < 100.000 t/dia
Categoria I	900	1500
Categoria II	1500	2000
Categoria III	2000	2500

Fonte: REIS (2014)

Oliveira Filho *et al.* (2010b) propõe um sistema de classificação que leva em consideração o tempo de permanência da via, como apresentado na Tabela 9, no entanto quando comparada às demais classificações, ele dispõe de um maior número de classes de estradas e propõe parâmetros de projetos, construção e manutenção das estradas para as classes, os quais estão expostos nas figuras Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19, onde “P” indica providência e “N”, não providência, significando que há requisitos a serem atendidos, ou não, respectivamente (REIS, 2014),.

Tabela 9 - Classificação de estradas de mina, segundo Oliveira Filho et al. (2010b)

Classe	Tempo de permanência
C1	1 mês
C2	3 meses
C3	6 meses
C4	1 ano
C5	2 anos
C6	5 ou mais anos

Fonte: REIS (2014)

Figura 16 - Matriz de requisitos para o Projeto Geométrico

Guia Prático-GP - PROJETO GEOMÉTRICO							
		CLASSE					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
Parâmetro	Distância de Frenagem	P	P	P	P	P	P
	Distância de Visibilidade	P	P	P	P	P	P
	Largura	P	P	P	P	P	P
	Superelevação	P	P	P	P	P	P
	Raio de curvatura	P	P	P	P	P	P
	Transição para superelevação	P	P	P	P	P	P
	Inclinação para dimensionamento de drenagem	P	P	P	P	P	P
	Greide	P	P	P	P	P	P
	Interseções entre elementos geométricos	P	P	P	P	P	P
	Leiras de segurança	P	P	P	P	P	P

Fonte: REIS (2014)

Figura 17 - Matriz de requisitos para o Projeto Estrutural

G.P.- PROJETO ESTRUTURAL							
		CLASSE					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
PARÂMETRO	Revestimento	P	P	P	P	P	P
	Base	P	P	P	P	P	P
	Sub-base	P	P	P	P	P	P
	Sub-leito	P	P	P	P	P	P

Fonte: REIS (2014)

Figura 18 - Matriz de requisitos para o Projeto de Drenagem

G.P.- PROJETO DE DRENAGEM							
		CLASSE					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
PARÂMETRO	Valetas de proteção de corte	P	P	P	P	P	P
	Valetas de proteção de aterro	P	P	P	P	P	P
	Sarjetas de aterro	P	P	P	P	P	P
	Sarjetas de corte	P	P	P	P	P	P
	Descidas d'água	P	P	P	P	P	P
	Saídas d'água	P	P	P	P	P	P
	Caixas coletoras	P	P	P	P	P	P
	Bueiros de Greide	P	P	P	P	P	P
	Dissipadores de energia	P	P	P	P	P	P

Fonte: REIS (2014)

Figura 19 - Matriz de requisitos para a fase de Construção

G.P.- CONSTRUÇÃO							
		CLASSE					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
PARÂMETRO	Subleito	P	P	P	P	P	P
	Subbase	P	P	P	P	P	P
	Base	N	N	P	P	P	P
	Anti- pó	N	N	P	P	P	P

Fonte: REIS (2014)

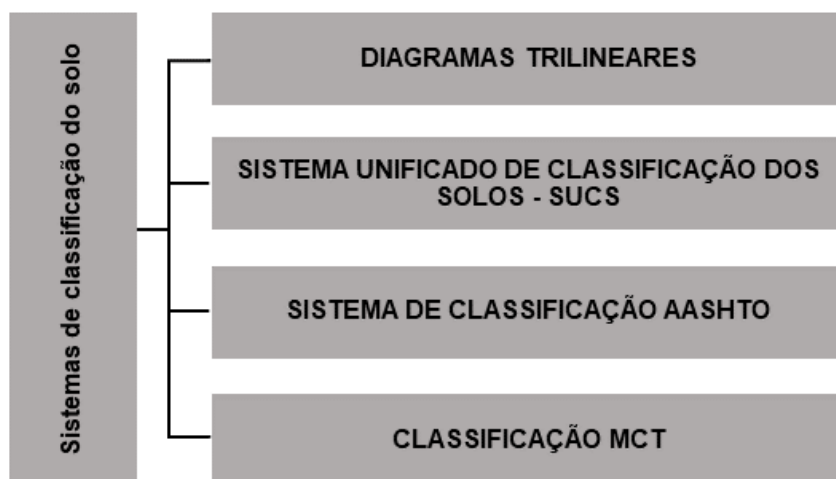
3.7. CLASSIFICAÇÃO DE SOLO

A classificação dos solos é primordial para os projetos de estradas, desempenhando papel indispensável nos projetos de pavimentação e na construção, servindo como base para definir os materiais das camadas de pavimentação, permitindo a previsão do comportamento de engenharia do solo em conjunto com a mecânica do solo, a depender de sua finalidade.

Devido à série de tipologias de solos existente na natureza, é fundamental um sistema de classificação a partir de características geotécnicas similares de um determinado agrupamento natural dos solos, através de ensaios de laboratório ou de campo para determinação das propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos. “Dentre os fatores importantes de se classificar os solos, está o poder de prever os seus comportamentos, mecânico e hidráulico, seu comportamento geotécnico esperado, em obras de engenharia, mineração e meio ambiente, conhecendo-se, ao mesmo tempo, as suas formas de ocorrência e a geometria das camadas nos locais em estudo” (DRESCH, 2018, p.23).

Murrieta (2018) destaca, conforme mostrado na Figura 20, os sistemas de classificações mais usados na geotecnia brasileira e mundial:

Figura 20 - Diferentes formas de classificação do solo

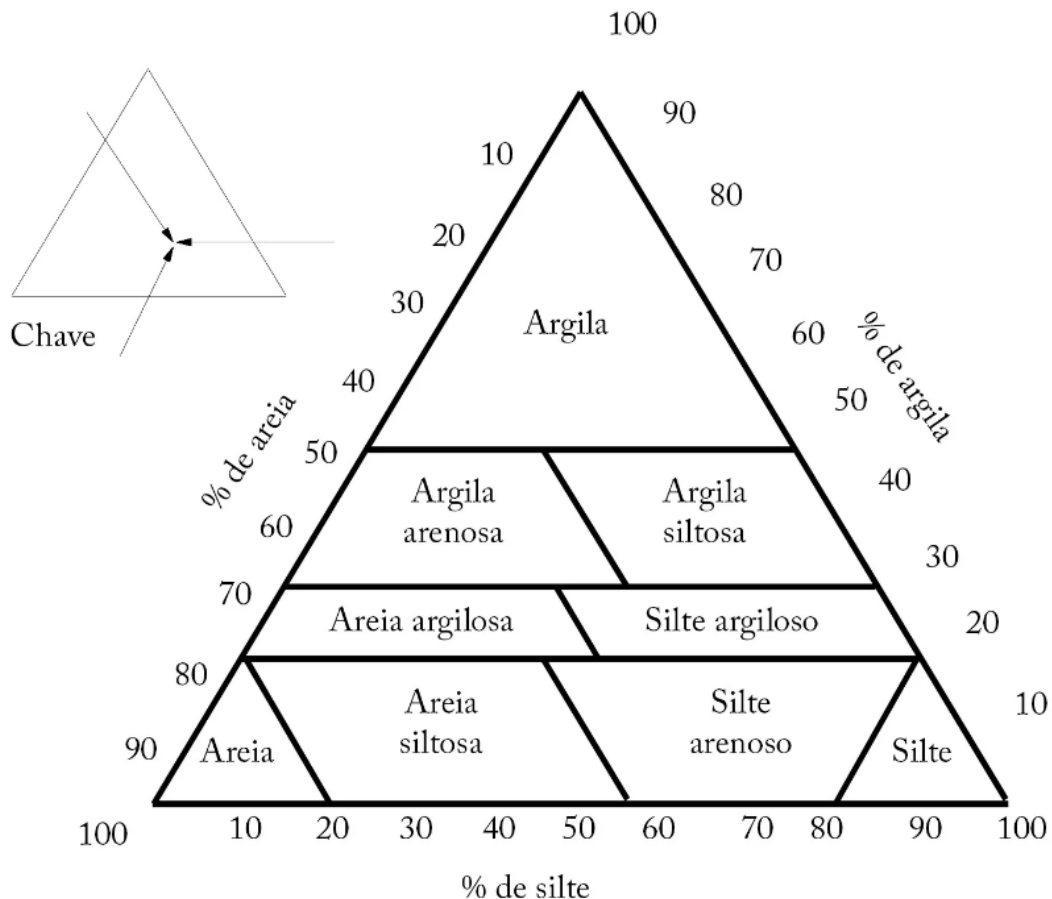


Fonte: Adaptado de MURRIETA (2018)

3.7.1. Diagramas Trilineares Ou Triangulares

Os Diagramas Trilineares ou Triangulares é uma das classificações mais antigas. Criado no Massachussets *Institute of Technology* (MIT), onde, pelos lados de um triângulo equilátero convenientemente dividido, entra-se com as percentagens de areia, silte e argila do solo, a região onde se encontra o ponto de convergência dessas entradas, definirá o solo, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Diagrama Trilinear ou Triangulares



Fonte: MURRIETA (2018)

No entanto esta classificação encontra-se limitada quanto ao refere-se a presença de pedregulhos, caso o percentual deste seja grande, estes diagramas não podem ser aplicados, pois o mesmo não consideram pedregulhos e a matéria orgânica que possa estar presente, além de não levarem em consideração a plasticidade do solo, por isso são cada vez menos usuais em geotecnia (MURRIETA, 2018).

3.7.2. Sistema Unificado De Classificação Dos Solos – SUCS

O *Unified Soil Classification System* ou SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS (SUCS), proposto por Casa Grande e padronizado pela ASTM D2487, um dos mais usuais na geotecnia mundial, além de considerar critérios definidos pela granulometria, instaura a Carta de Plasticidade, um sistema de coordenadas onde no eixo das abcissas está o

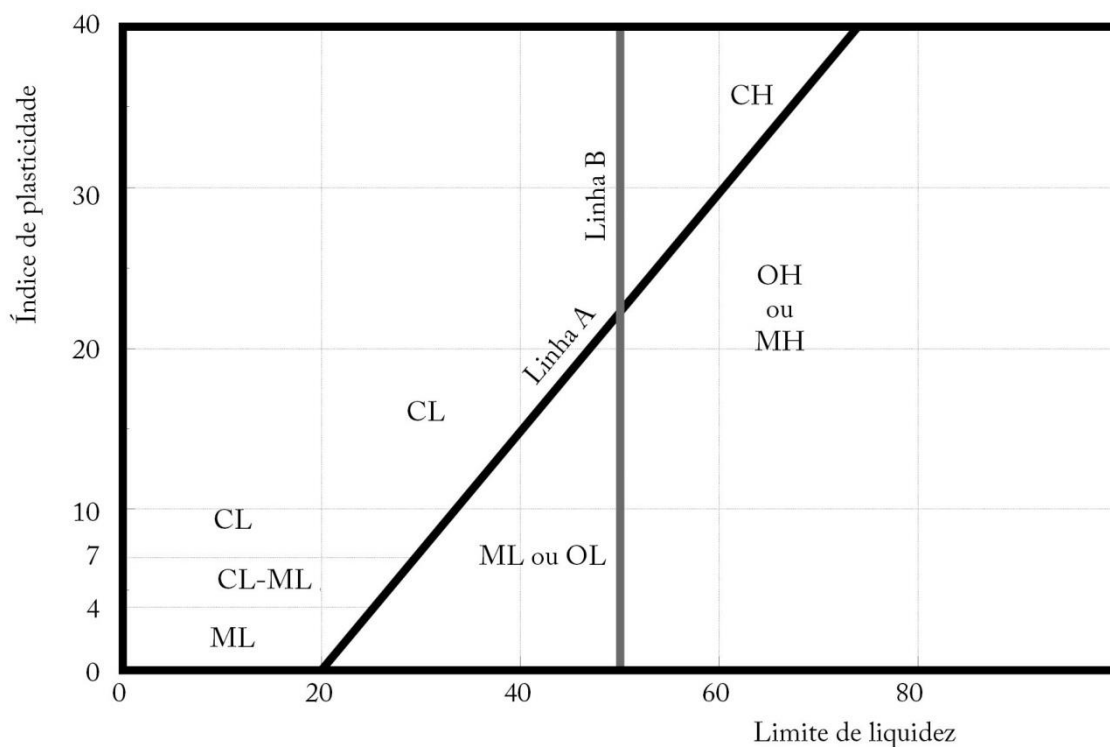
Limite de Liquidez, w_L , e no eixo das ordenadas. o Índice de Plasticidade, IP, que permite levar-se em consideração as características de plasticidade do solo, ou da fração fina, na classificação.

“A Carta de Plasticidade considera que os solos situados acima da linha A, definida pela equação $IP = 0,73 (w_L - 20)$, são solos argilosos. Os solos situados abaixo da linha A são solos siltosos. Da mesma forma os solos situados à esquerda da linha B, cuja equação é $w_L = 50$, são de baixa plasticidade e os situados à direita da linha B são de média a alta plasticidade” (MURRIETA, 2018, p. 84).

A Carta de Plasticidade é apresentada na Figura 22.

Figura 22 - Carta de Plasticidade

Carta de plasticidade



Fonte: MURRIETA (2018)

As opções para classificação previstas encontram-se no Anexo A.

3.7.3. Sistema De Classificação AASHTO

Inicialmente proposto por Terzaghi e Hogentogler em 1928, evoluindo para *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), também conhecido como *Highway Research Board* (HRB), no

Brasil, este sistema de classificação leva em consideração a granulometria e a plasticidade dos solos e incorpora como critério de classificação o Índice de Grupo (IG), por ter sua origem ligada à pavimentação de aterros. O IG é um número inteiro que define a capacidade de suporte do solo, o qual pode ser obtido através da Equação 5 (MURRIETA, 2018):

$$IG = 0,2a + 0,05ac + 0,01bd \quad (5)$$

Onde:

$$a = P_{200} - 35 \text{ (com } 0 < a < 40) \quad (6)$$

$$b = P_{200} - 15 \text{ (com } 0 < b < 40) \quad (7)$$

$$c = w_L - 40 \text{ (com } 0 < c < 20) \quad (8)$$

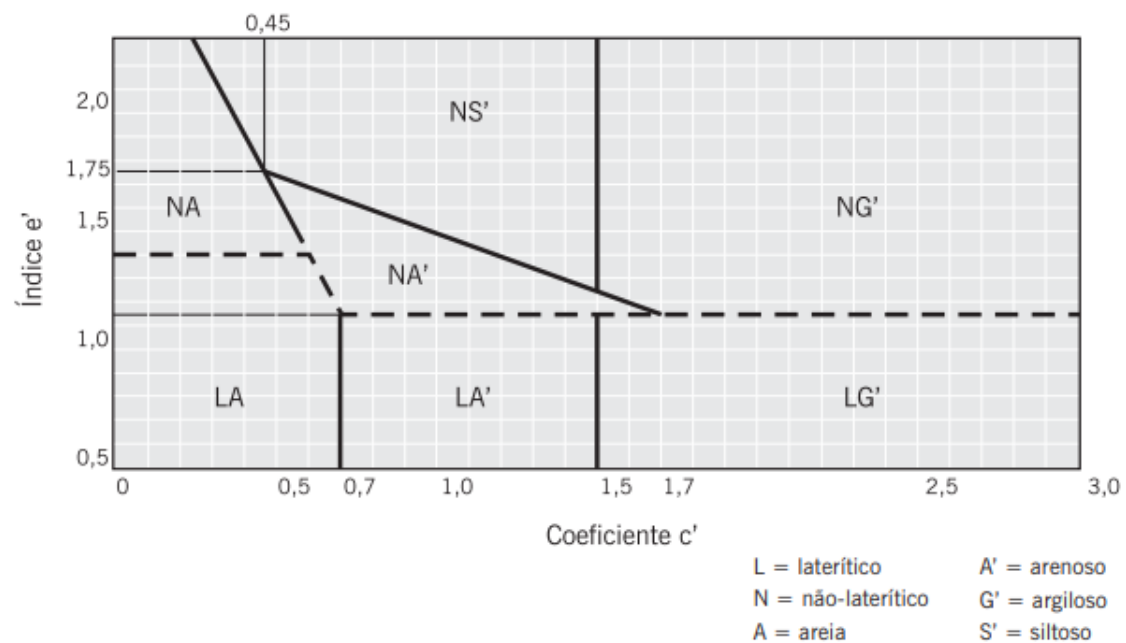
$$d = IP - 10 \text{ (com } 0 < d < 20) \quad (9)$$

Sendo w_L correspondente ao limite de liquidez e P_{200} o percentual de passante na peneira de 200#. As opções para a classificação previstas na tabela são mostradas no Anexo B.

3.7.4. Classificação MCT

Devido às limitações apresentadas pelos sistemas de classificações de solos convencionais em relação aos solos tropicais, Nogami e Villibor (1981) sugeriram uma classificação nomeada de Miniatura, Compactado, Tropical (MCT), que permite avaliar propriedades fundamentais dos solos associados à contração, permeabilidade, expansão, coeficiente de penetração d'água, coesão, capacidade de suporte e compactação, utilizando corpos-de-prova de dimensões reduzidas. O MCT divide o solo em duas grandes classes de comportamento: laterítico e saprolítico (não laterítico), compreendendo sete grupos. Através dos ensaios é possível classificar os solos em um dos sete grupos, podendo-se com isto prever as propriedades mecânicas e hidráulicas deles, compactados para fins de obras viárias. Essa classificação se dá a partir da Carta de Classificação MCT, apresentada na Figura 23 (MURRIETA, 2018).

Figura 23 - Classificação MCT (Nogami e Villibor, 1981)



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008)

Murrieta (2018) cita as subdivisões em grupos, dessas duas classes conforme o comportamento e característica granulométrica do solo, sendo os lateríticos e não lateríticos, representados pelas letras **L** e **N** respectivamente:

LG': argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas

LA': areias argilosas lateríticas

LA: areias com pouca argila laterítica

NG': argilas, argilas siltosas e argilas arenosas não lateríticas

NS': siltes caulínicos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos não lateríticos

NA': areias siltosas e areias argilosas não lateríticas

NA: areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não lateríticos

3.8. ESTUDO DE CARREGAMENTO VEICULAR

O DNIT (2006) enfatiza a importância da classificação da frota e os pesos por eixos de cada veículo de carga, pois a distribuição da carga por eixo considerado adequadamente permite previsões mais precisas da solicitação futura do tráfego.

Os estudos do carregamento veicular sob o pavimento incluem a compreensão dos esforços de natureza dinâmica produzidas pelas rodas que trafegam sob o pavimento, assim o cálculo das tensões, deformações e deslocamento das áreas de contato do pneu com o pavimento (MEDINA; MOTTA, 2015).

O peso bruto do veículo distribui-se segundo a distribuição de carga por eixo, dividindo-se essa carga por roda, sendo normalmente dada como 33% no eixo dianteiro e 67% no eixo traseiro, além do efeito da sobreposição de carga que deve ser considerado (PERONI, 2021).

3.9. MÉTODOS DO DNER E MÉTODO DA ASSTHO PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

O projeto de pavimentação que apresente capacidade para suportar o tráfego imposto e as variações climáticas envolve a determinação da espessura das camadas a comporem o projeto de pavimentação, assim como os materiais que serão utilizados. Pinto e Preussler (2002) sugerem as seguintes etapas para o dimensionamento de um pavimento:

- I. determinação dos materiais de cada camada e suas capacidades estruturais;
- II. especificação dos sistemas de drenagem subterrânea à subsuperfície necessários;
- III. comparativo econômico entre os vários materiais disponíveis e o transporte necessário;
- IV. investigações geotécnicas dos solos e materiais disponíveis;
- V. conhecimento das características climáticas da região;

- VI. pleno conhecimento da natureza das cargas decorrentes do tráfego.

Oliveira *et al.* (2010b) ressalta que o dimensionamento do pavimento é necessário para acessos construídos sobre terrenos (subleitos) pouco competentes e com baixa capacidade de suporte.

Devido à complexidade das estruturas de pavimentação e da previsibilidade de seu desempenho ser realizada com simplificações, desenvolveram-se alguns métodos de dimensionamento de pavimentos. Balbo (2007) apresenta três desses métodos: os empíricos, os semiempíricos e os empíricos-mecanicista ou também conhecido como semiteóricos.

Boussinesq (1885) e Burmister (1943) foram primordiais na busca por elementos para cálculo das tensões e deformações no pavimento, propondo a utilização da Teoria da Elasticidade, a qual se tornou o principal fundamento para o desenvolvimento dos métodos mecanicistas-empíricos. Assim, a partir de características da estrutura e propriedades mecânicas dos materiais das camadas que o compõe, como, espessuras, módulos de resiliência e os coeficientes do Poisson dos materiais componentes; e da composição do tráfego atuante, o comportamento do pavimento pode ser estimado (PITANGUI, 2019).

A Teoria da Elasticidade de meios semi-infinitos homogêneos, formulada por Boussinesq (1885), é utilizada para fundamentar os métodos empíricos de dimensionamento, como o por carga de roda (CBR). Essa teoria considera o solo um meio semi-infinito, elástico, homogêneo e isotrópico, com forças aplicadas na superfície, além de ter em conta que as cargas verticais são uniformemente distribuídas ou concentradas (SOUSA, 2011).

Já a Teoria da Elasticidade em meios semi-infinitos estratificados, proposta por Burmister (1943), considera um sistema de duas, sendo a primeira o pavimento e a segunda, o subleito. Para cálculo das tensões e deformações desse sistema estratificado e de carga distribuída numa área circular, ela trabalha com as seguintes hipóteses (MEDINA; MOTTA, 2015, p. 116):

- os materiais são elásticos, isotrópicos e homogêneos; a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão iguala-se ao módulo de tração;
- as camadas não têm peso, são ilimitadas transversalmente, exceto a camada inferior, que é semi-infinita;
- na superfície da camada superior, fora da área carregada, só ocorrem tensões normais, mas a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- O módulo de elasticidade dos materiais do pavimento é variável conforme a camada, no entanto, para um mesmo material é considerado constante material.

3.9.1. Métodos empíricos

Os modelos empíricos e semiempíricos são frutos da modelagem estatística de evolução de parâmetros físicos observados nos pavimentos e da extrapolação e expansão de resultados empíricos com base em uma teoria analítica consistente, “[...] tendo como exemplo mais importante os critérios que se pautam pela parametrização das estruturas de pavimento por meio de valores de *California Bearing Ratio* (CBR) de suas camadas” (DRESCH, 2018, p. 158).

Segundo Masetti *et al.* (2011) e Dresch (2018), um dos mais usuais métodos empíricos de dimensionamento das camadas de um pavimento é realizado através do ensaio CBR, correspondente ao Índice de Suporte Califórnia (ISC), e a carga de roda. A metodologia de carga de roda ou simplesmente CBR pode dar-se a partir de um ábaco contendo curvas com os valores de CBR dos materiais ensaiados versus a espessura da camada para distintos valores de carga de roda.

O CBR objetiva a determinação da capacidade relativa de suporte dos materiais agregados que compõe as camadas, considerando-se as características dos materiais a serem utilizados, a partir desse ensaio, respeitando os valores mínimos de modo a manter as condições adequadas do pavimento. Os resultados dos ensaios de resistência à penetração variam

conforme a textura do solo e a sua constituição mineral, entretanto certos tipos de solos exibem valores de CBR previsíveis (Tabela 10).

Tabela 10 - CBR para alguns tipos de solo

Tipo de solo	CBR
siltes e outros solos expansíveis	<6%
solos finos, arenosos	entre 8 e 20%
solos grossos, como, por exemplo, os pedregulhos e as britas graduadas	50 a 100%

Fonte: Adaptado de DRESCH (2018)

O valor do CBR permite determinar, “por meio de equações empíricas, a espessura da camada de pavimento flexível necessária, em função do tráfego” (DNIT, 2006, p. 37). Como parâmetros de projeto, pisos e pavimentos rígidos requerem CBR maior que 8%, enquanto os pavimentos flexíveis exigem valores de CBR maiores que 12% (DRESCH, 2018).

“O método CBR não leva em conta as propriedades do material de revestimento e assim determina-se a camada de revestimento por diferença entre o topo da camada total a ser construída e o topo da camada de base projetada” (SOUSA, 2011, p.91).

Os métodos empíricos ainda limitam-se a particularidades referentes a

“condições climáticas, tipos de materiais e pavimentos, características geomorfológicas e condições de carregamento. Eles também não consideram o trincamento por fadiga nos pavimentos flexíveis, devido ao efeito de repetição de deformações elásticas excessivas” (SOUSA, 2011, p.27).

3.9.2. Métodos mecanicistas – empíricos

“Os métodos semiteóricos ou empírico-mecanicistas, também chamados mecanicistas-empíricos, são aqueles baseados na avaliação do comportamento,” baseando-se em modelos matemáticos que utilizam técnicas computacionais de análise estrutural. São calculadas tensões e deformações, assim como mecanismos de fadiga e deformabilidade” (MASETTI *et al.*, 2011, p. 57).

O DNIT (2006) ressalta que esse método se caracteriza como um modelo de previsão de desempenho que permite quantificar a redução do nível de serviço ou a geração de defeitos ao longo da vida útil da via, e constitui-se de três etapas:

- um modelo estrutural para cálculo das respostas induzidas, tensão-deformação, pela carga das rodas em movimento nas camadas de pavimento;
- função de transferência, capazes de relacionar as respostas das estruturas ao carregamento imposto, assim como geração e propagação de defeitos;
- fatores ou funções de calibração, que ajustam as previsões das funções de transferência de modo a se reproduzir dados de uma determinada base empírica.

Um dos principais métodos mecanicistas-empíricos é o método de dimensionamento da AASTHO, o qual correlaciona as propriedades mecânicas dos materiais, como CBR e módulo de resiliência, para a obtenção do coeficiente de equivalência estrutural, além de propor coeficientes modificadores, que levam em consideração as características drenantes dos materiais (DRESCH, 2018).

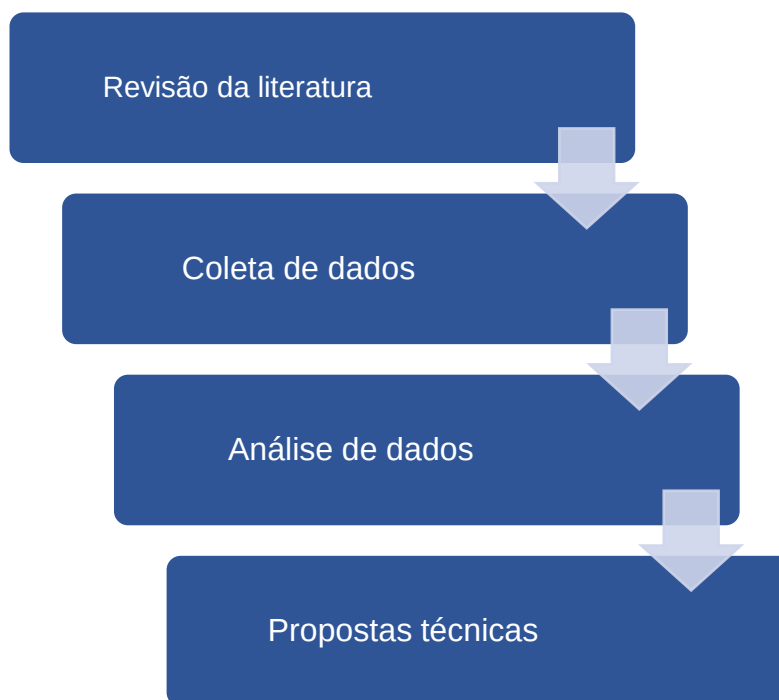
“A AASHTO por meio de suas pesquisas vem evoluindo na análise mecanística-empírica, dando a possibilidade do projetista, após escolhida a estrutura inicial, efetuar a análise detalhada se os critérios de desempenho estão sendo atendidos, em que o método em questão avalia os critérios de deformação permanente (ATR), trincas por fadiga de baixo para cima (bottom-up) e de cima para baixo (top-down), trincas térmicas e irregularidades superficiais (IR)” (DRESCH, 2018, p.175).

4. METODOLOGIA

Este estudo trata-se de uma pesquisa mista (de métodos quali-quantitativos), de caráter exploratório-descritivo. As pesquisas exploratórias objetivam proporcionar maior proximidade e compreensão do problema em questão, envolvendo levantamentos bibliográficos, entrevistas e análise de exemplos, a fim de fornecer informações que permitam a construção de hipóteses (GIL, 2002).

As pesquisas descritivas por sua vez buscam “fazer uma análise minuciosa e descritiva do objeto de estudo. Ou seja, a finalidade dela é analisar os dados coletados sem que haja a interferência do pesquisador” (BERSOT, 2019). A maioria das pesquisas de cunho descritivo são de temas já conhecidos, e umas das suas principais características envolve técnicas de coletas de dados (GIL, 2002).

Figura 24 - Metodologia



Fonte: AUTOR PRÓPRIO

Inicialmente realizou-se uma análise preliminar do tema, por meio de uma revisão da literatura (Figura 24). A revisão da literatura foi utilizada para

familiarização com o tema em estudo, nesta etapa foram utilizados livros, artigos e outros tipos de publicações relacionadas com a temática “pavimentação de estradas”.

A análise realizada, com o objetivo de levantar os resultados dos parâmetros construtivos propostos para blindagem de acesso das minas do Complexo Mariana, envolveram observações em campo e análise de conteúdo, especificamente, de alguns indicadores.

Posteriormente, foi desenvolvido um estudo de caso, que permitiu observar e avaliar os parâmetros de dimensionamento dos pavimentos das estradas de acesso das minas do Complexo Mariana, da mineradora Vale S/A. Essa etapa foi realizada com apoio de colaboradores internos da mineradora, os quais disponibilizaram informações e documentos dos procedimentos internos da empresa quanto a pavimentação dos acessos de mina do Complexo Mariana.

A análise dos documentos disponibilizados foi realizada por meio de uma análise de conteúdo. Para Bardin (2011), o termo análise de conteúdo designa:

“um conjunto de técnicas de análise das comunicações visando a obter, por procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, indicadores (quantitativos ou não) que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção/recepção (variáveis inferidas) destas mensagens” (BARDIN, 2011, p. 47).

Bandin (2011) sugere a seguinte organização para a análise de conteúdo, disposta em três fases, conforme apresentado na Figura 25:

Figura 25 - Organização da análise de conteúdo



Fonte: Adaptado de BANDIN (2011)

Com as informações das etapas anteriores, serão propostos procedimentos técnicos para a implementação dos projetos de pavimentação de estradas de mina, buscando discutir e sugerir melhores práticas no dimensionamento de pavimentos.

5. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso, apresentando neste trabalho, foi realizado nas minas pertencentes ao Complexo Mariana da mineradora Vale, cujo objetivo é analisar a metodologia utilizada no dimensionamento de pavimentação dos acessos da mina.

5.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Vale está entre as maiores mineradoras globais e uma das mineradoras líderes no mercado global de minério de ferro, pelotas de minério de ferro e níquel. Está presente em cerca de 30 países, atuando não só apenas no setor minerário, mas também em logística – com ferrovias, portos, terminais e infraestrutura de última geração -, em energia e em siderurgia (VALE, 2021).

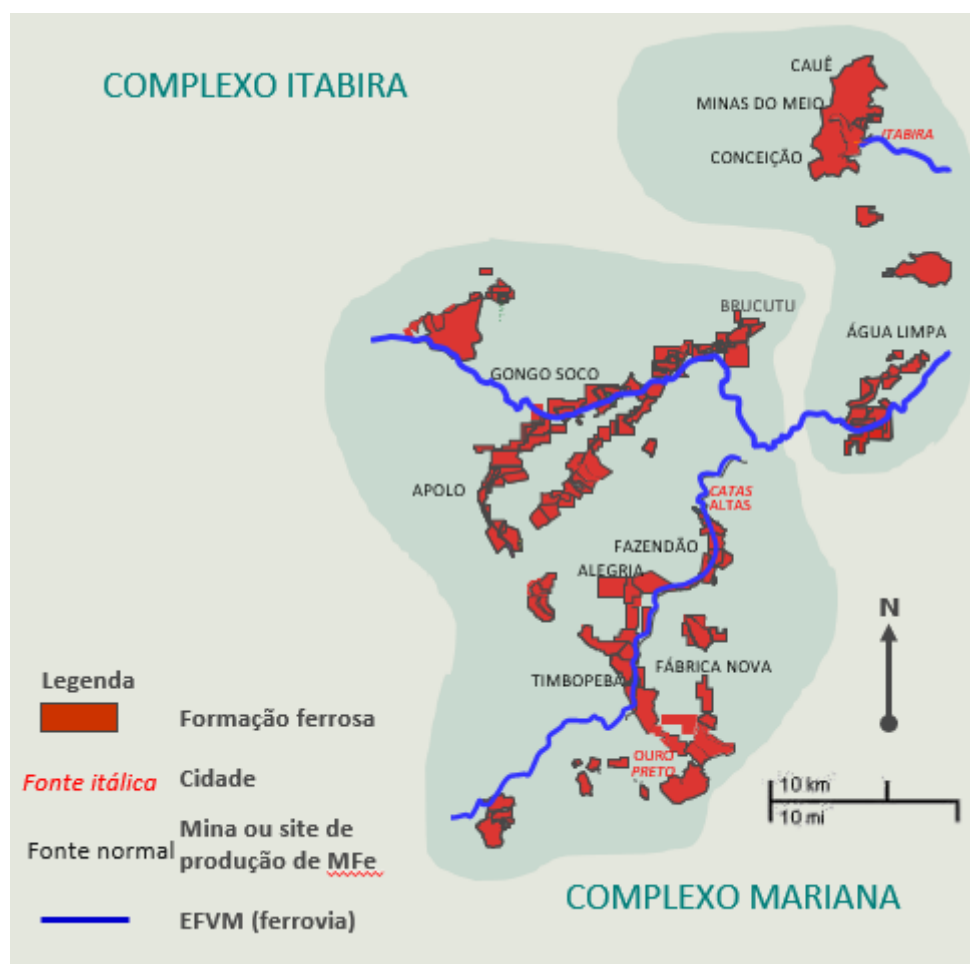
No Brasil, a VALE opera 4 corredores: Norte, Sul, Sudeste e Centro Oeste. As minas dos sistemas Sul e Sudeste estão localizadas no quadrilátero

ferrífero, em Minas Gerais, e são conectadas por ferrovias a portos no Rio de Janeiro e Espírito Santo.

O estudo em questão foi realizado no Sistema Sudeste que é formado por 2 complexos: Itabira e Mariana, com foco no Complexo Mariana, onde estão localizadas as minas de Alegria, Fábrica Nova e Fazendão (Figura 26).

“Itabiritos, dolomitos ferruginosos e filitos hematíticos compõem um conjunto de formações ferríferas metamórficas do Grupo Itabira na região do Quadrilátero Ferrífero, uma das principais regiões produtoras de minério de ferro do mundo” (ROSIÈRE e CHEMALE JR., 2000, p. 27).

Figura 26 - Complexo Itabira e Complexo Mariana



Fonte: VALE (2019)

Barbosa (2010 apud SEVERINO, 2018) lista os principais tipos de formações ferríferas modelados e estimados nas minas do Complexo Mariana: hematita, hematita goethítica, itabirito friável rico, itabirito friável, itabirito

compacto, itabirito goethítico, itabirito argiloso rico, itabirito argiloso, itabirito manganésífero e canga.

5.2. MATERIAL DE CONSTRUÇÃO DA SUB-BASE, BASE E REVESTIMENTO

Foi realizado um estudo de resistência do material de blindagem a ser aplicados nas camadas do pavimento, realizando testes de resistência com materiais provenientes das reservas dos sites e uma busca no mercado externo de material competente. Atendendo as premissas de construção, foi levantando possíveis materiais competentes que poderiam ser aplicados nas pistas, podendo ser gnaisses ou itabirito. Tendo em vista as opções propostas de materiais, foram realizados ensaios de abrasão “*Los Angeles*”, para seleção do material para camada de base. Levando-se em consideração a abrasividade e resistência apresentada em testes, os materiais propostos para comporem as camadas de sub-base, base e revestimento foram:

- Sub-base: mistura areia e argila bem graduada
- Base: pedregulho bem graduado
- Revestimento: rocha britada

5.3. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO

O dimensionamento do pavimento foi realizado utilizando-se um Manual de construção de acessos interno da empresa, que estabelece diretrizes para o projeto, construção e manutenção de acessos de mina a céu aberto. O procedimento propõe o projeto de pavimentação a partir de métodos empíricos, especificamente o método CBR. No Complexo Mariana o CBR ideal do pavimento, considerando a frota e recomendações das literaturas disponíveis, é de 80%. Como, inicialmente não havia sido realizada a caracterização do

material in situ dos acessos, buscando ser mais conservador, considerou-se as piores condições de CBR, conforme ábaco da Figura 15 (disponível no item 3.5.6) para dimensionamento do pavimento. No entanto, nas situações rotineiras de campo, devido algumas particularidades geológicas em regiões distintas das minas, seguindo-se os resultados de testes de caracterização do solo, podem ser realizados alguns ajustes, quanto os valores de CBR utilizados para definição da espessura das camadas que constituem o pavimento.

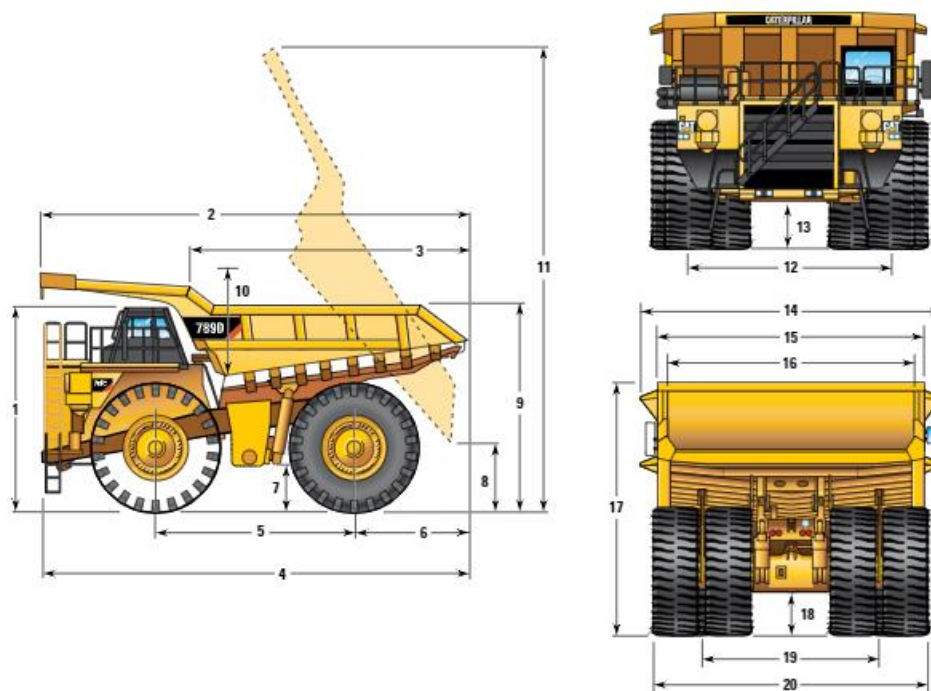
Foram seguidas as seguintes premissas:

- Largura de acesso: 25 metros
- Peso bruto dos caminhões CAT 789 D (340 toneladas) e o Komatsu 730 E (366 toneladas).
- Material competente para forro do acesso disponível na mina.
- Material competente não disponível na Mina (pedra de mão e brita).
- Pontos de aplicação com distancias pré-definidas.

5.3.1. Método empírico

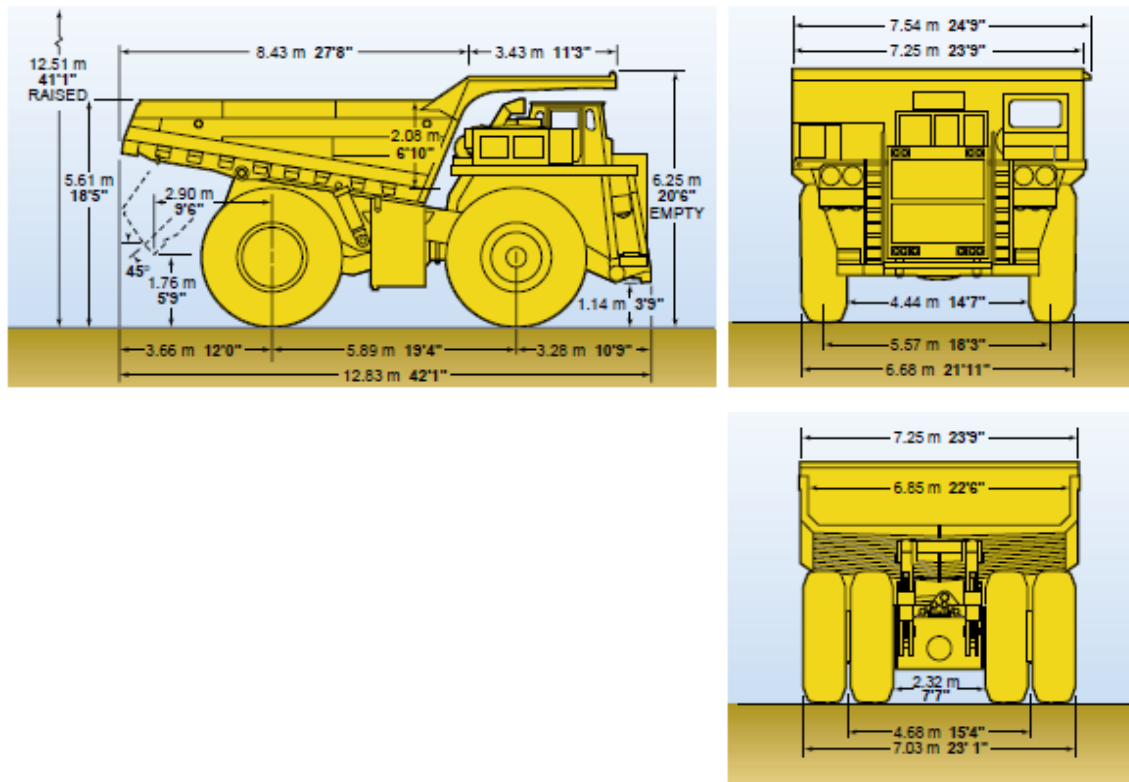
Considera-se um projeto de construção de uma estrada mineira sobre um terreno constituído por argila plástica (CBR=5%). O veículo de maior porte que transitará por essa estrada são os caminhões fora-de-estrada e CAT 789 D (Figura 27) e Komatsu 730 E (Figura 28).

Figura 28 – Dimensões do Caminhão CAT 789D



Fonte: CATERPILLAR (2011)

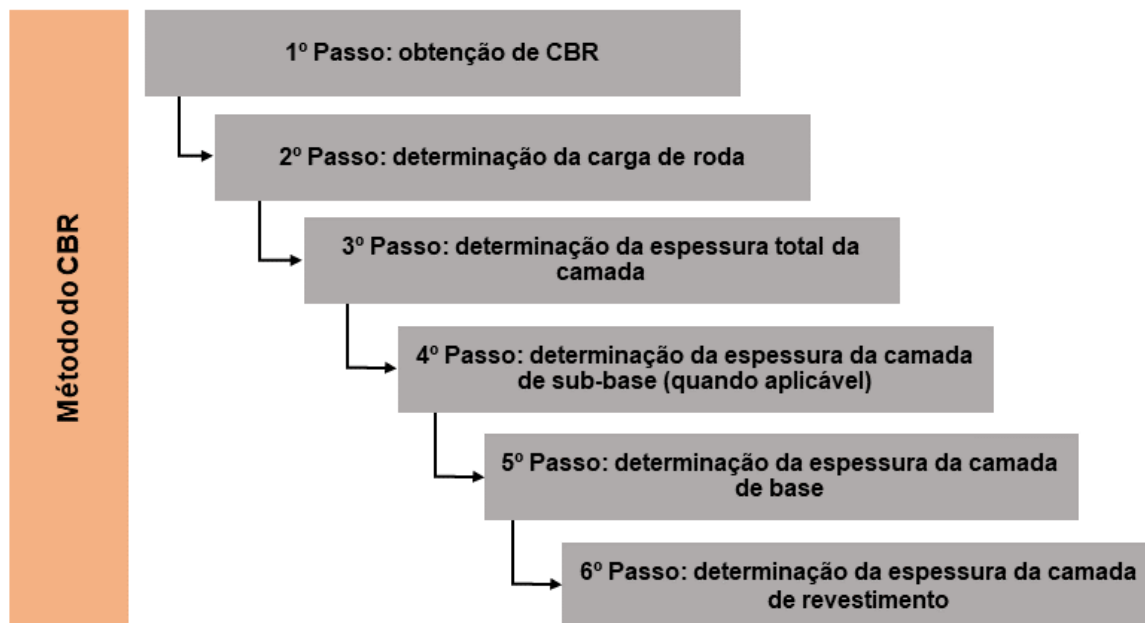
Figura 27 – Dimensões Caminhão Komatsu 730E



Fonte: KOMATSU MINING SYSTEMS (2001)

O método empírico aplicados para dimensionamento do pavimento, envolveu os seguintes passos:

Figura 29 - Passos do Método do CBR



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

a) Primeiro passo: obtenção de CBR

A etapa para definição das espessuras das camadas do pavimento, inicialmente, envolve a realização de ensaios laboratoriais para determinação dos valores de CBR do subleito pré-existente (procedimento recomendado) e dos materiais que comporão as camadas do pavimento ou atribuir valores de CBR localizando na base do ábaco da Figura 15 (disponível no item 3.5.6) os materiais a serem utilizados (procedimento a ser utilizado para obtenção de indicação geral da espessura das camadas).

b) Segundo passo: determinação da carga de roda

Determinação da carga de roda do veículo mais pesado que transitará pela estrada, considerando o peso do veículo carregado. Esse valor deve ser consultado nas especificações disponibilizadas pelo fornecedor do equipamento. A carga máxima por roda foi obtida considerando-se a

distribuição percentual do caminhão carregado correspondente a 33% no eixo dianteiro e 67% no eixo traseiro.

Para esse estudo de caso, inicialmente tem-se:

Número de eixos: 2

Número de pneus eixo traseiro: 4

Número de pneus eixo dianteiro: 2

Distribuição de peso aproximada (caminhão carregado):

Eixo dianteiro: 33%

Eixo traseiro: 67%

Tabela 11 - Especificações técnicas CAT 789D e Komatsu 730E

Modelo	Caminhão CAT 789D	Caminhão Komatsu 730E
Peso bruto do veículo	324319 kg / 715.000 lb	324318 kg/ 715,000 lb
Carregamento máximo eixo dianteiro	117975 lb	109064,5 lb
Carregamento máximo eixo traseiro	119226,25 lb	124217,75 lb

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

Considera-se o maior carregamento, o que nesse caso corresponde a aproximadamente 125.000 lb.

Carga de roda = 125.000 lb (56,699 t)

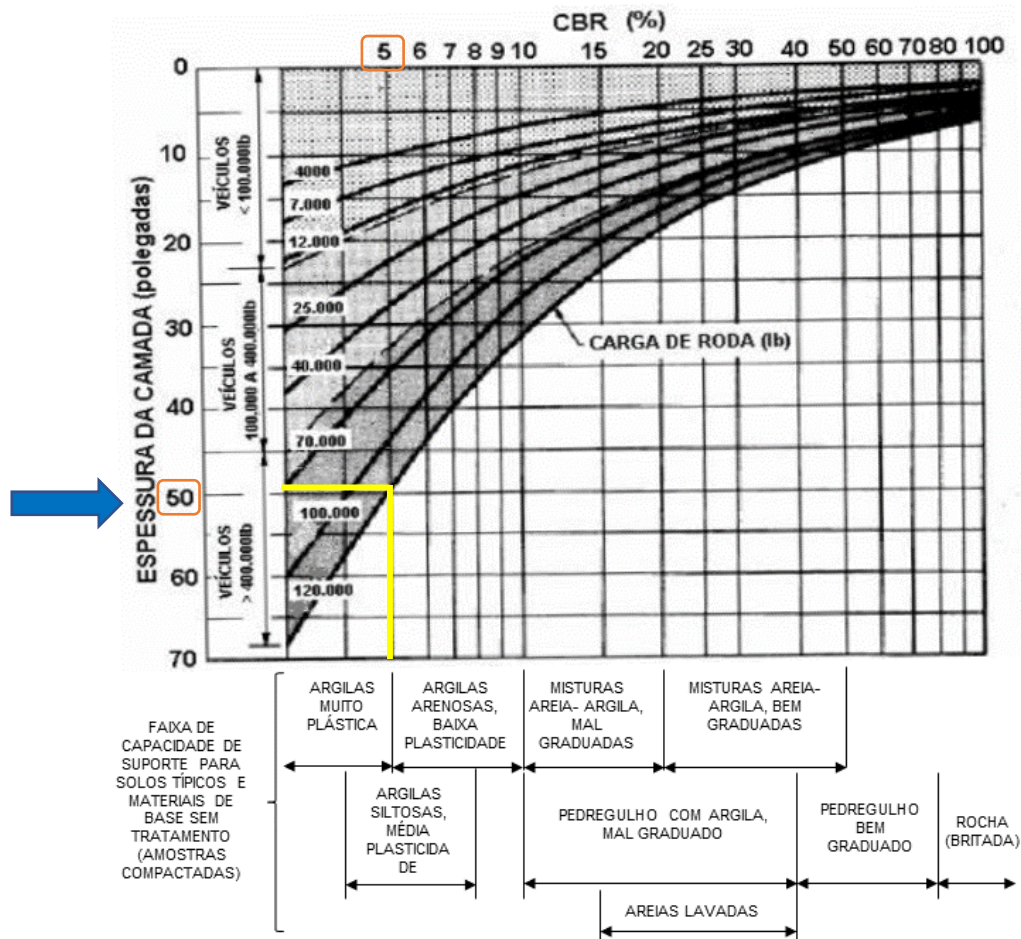
c) Terceiro passo: determinação da espessura total da camada

A partir das curvas do ábaco, com base na carga de roda e no valor do CBR do material do subleito, determina-se a espessura total da camada a ser construída sobre a sub-base. Foi considerado o pior cenário para o material de subleito, sendo constituído por argila (CBR=5%).

Ao localizar no ábaco (Figura 30) o ponto de interseção da curva da carga de roda (125.000lb) com o eixo horizontal das linhas CBR, a espessura do pavimento será de 50 polegadas (127 cm), ou seja, a distância necessária

entre o topo da camada de revestimento e o topo da camada de subleito é 127 cm.

Figura 30 - Determinação da espessura da camada



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

d) Quarto passo: determinação da espessura da camada de sub-base (quando aplicável)

A partir das curvas do ábaco, com base na carga de roda e no valor do CBR, encontra-se a distância entre o topo da camada de sub-base e o topo da camada de revestimento. O material escolhido para compor a sub-base foi um tipo de mistura areia-argila, bem graduada, que para este projeto adotou-se o itabirito friável disponível na mina, com CBR=30%.

e) Quinto passo: determinação da espessura da camada de base

A partir das curvas do ábaco, o ponto de interseção da curva de carga de roda e o valor do CBR da base a ser considerado, no caso o pedregulho bem graduado (CBR=50%), encontra-se a distância entre o topo da camada de base e superfície final da estrada, correspondente a aproximadamente 11 polegadas (28 cm).

f) Sexto passo: determinação da espessura da camada de revestimento

A partir das curvas do ábaco, com base na carga de roda e no valor do CBR do material do subleito, determinou-se a espessura total da camada de revestimento.

De forma a obter-se a espessura total das camadas, deve-se preencher 7 polegadas (18 cm) a partir do topo da camada de base, construindo-se a camada superior de revestimento. Preferencialmente deve-se usar rocha britada uniformemente graduada com CBR igual ou superior a 80%. Completa-se, assim, o dimensionamento do pavimento proposto.

Ressaltou-se que após aplicação dos passos anteriores em campo, observou-se a alta resistência ao rolamento principalmente dos veículos convencionais. Portanto aplicou-se uma pequena camada de material fino (gnaisse) para obter uma menor resistência ao rolamento, onde foi possível constatar uma pista de superfície muito dura e lisa, sem penetração e flexão.

5.4. CARACTERIZAÇÃO DOS ACESSOS DE MINA DO COMPLEXO MARIANA (SUBLEITO)

Considerando algumas prioridades quanto ao cenário climático previsto foi executado o projeto inicial, no entanto, posteriormente realizou-se a caracterização do subleito dos acessos das minas do complexo. Para a caracterização do material de subleito foram realizados sondagens e ensaios laboratoriais de amostras de solo de alguns acessos das minas de Alegria,

Fábrica Nova e Fazendão. Os furos de sondagem executados foram de aproximadamente 1,30 metros de profundidade.

As amostras coletadas foram submetidas aos seguintes ensaios de laboratório: Determinação da massa específica real dos grãos (MES); Granulometria por Peneiramento e Sedimentação (GPS); Limites de Atterberg (LL/LP); Índice de Suporte Califórnia (CBR); Compactação Proctor Intermediário (CPI); Compactação Proctor Modificado (COM).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. ANÁLISE DA BLINDAGEM

Os ganhos apresentados pela blindagem de acesso foram levantados a partir da análise de dados históricos relacionados à velocidade média de transporte nos trechos blindados anterior e posterior a aplicação da blindagem. Partiu-se também da coleta de dados referentes a registros de ocorrência de atolamento de veículos pré e pós aplicação do pavimento, além de uma análise de um banco de dados, buscando reunir dados referentes a movimentação de material para manutenção e readequação de forro, além de informações do sistema de despacho, levantando dados de apropriação dos equipamentos, cuja apropriação era manutenção/readequação de acesso. Tais análises foram atreladas a observação em campo, dos trechos blindados, por parte dos técnicos de mina, supervisores, engenheiros. A Tabela 12 mostra os principais ganhos na qualidade dos acessos de mina do Complexo Mariana após se aplicar a blindagem.

Tabela 12 - Ganhos da blindagem de acesso no Complexo Mariana

Ganhos da Blindagem
4,4 % de aumento de velocidade no trecho já blindado
Redução da necessidade de frequência de manutenção no acesso
Sem ocorrência de atolamento de veículos leves em período chuvosos
Redução da movimentação de material para manutenção e readequação dos acessos
Controle de turbidez

Fonte: Adaptado de VALE (2020)

Os ganhos da blindagem são de caráter econômico, ambiental e de segurança. O aumento da velocidade nos trechos blindados reflete diretamente nos indicadores de produtividade. A redução nas manutenções dos acessos,

além de assegurar menores paradas e interdições de acessos, refletiu na disponibilidade física dos equipamentos utilizados nas manutenções dos acessos, já que as mesmas ocorrerão com menor frequência, possibilitando maior aderência nas demais atividades da mina. Os fatores de segurança relacionam-se tanto a questão da condição das estradas que refletem na questão ergonômica dos operadores dos equipamentos trafegam na via, como na questão da redução e/ou eliminação das ocorrências de atolamentos de veículos nos períodos chuvosos, o que é um ganho significativo e pontual no quesito segurança, além de contribuírem para a redução na frequência de manutenções dos equipamentos de mina.

O controle da turbidez dos canais de desaguamento, é um reflexo da drenagem efetiva realizada pelos materiais constituintes das camadas de pavimentação.

6.2. ANÁLISE DOS ENSAIOS REALIZADOS

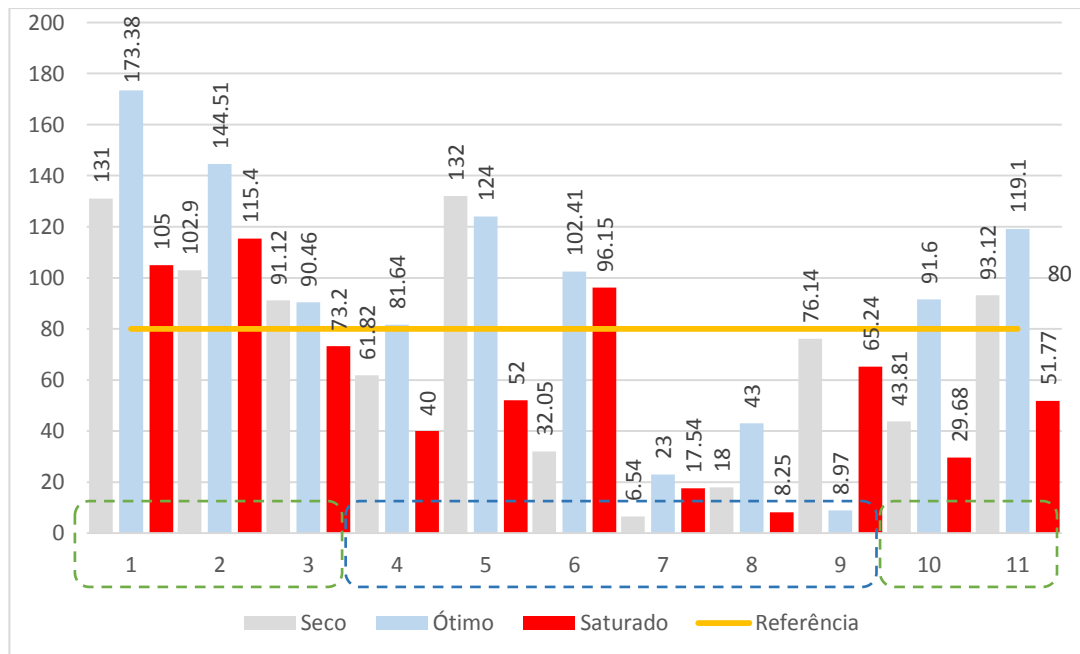
A Tabela 13 e a Figura 31 apresentam os resultados dos ensaios do CBR, o resultado de classificação dos solos amostrados é apresentado na Tabela 14.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de CBR

Amostras	Seco	Ótimo	Saturado
1	131	173,38	105
2	102,9	144,51	115,4
3	91,12	90,46	73,2
4	61,82	81,64	40
5	132	124	52
6	32,05	102,41	96,15
7	6,54	23	17,54
8	18	43	8,25
9	76,14	8,97	65,24
10	43,81	91,6	29,68
11	93,12	119,1	51,77

Fonte: Adaptado de VALE (2020)

Figura 31 – CBR dos acessos



Fonte: Adaptado de VALE (2020)

Tabela 14 - Resultados de classificação do solo

Granulometria por Peneiramento e Sedimentação - Designação do Solo

Areia Argilo Siltosa de Cor Marrom com pouco Pedregulho

Areia Silto Argilosa de Cor Marrom com Pedregulho

Areia Siltosa com vestígios de Argila de Cor Cinza com Pedregulho

Areia Siltosa com vestígios de Argila de Cor Cinza com pouco Pedregulho

Areia Siltosa com pouca Argila de Cor Marrom com Pedregulho

Areia Siltosa com vestígios de Argila de Cor Cinza com pouco Pedregulho

Fonte: Adaptado de VALE (2021)

Os ensaios realizados nas amostras de solos dos acessos, ainda não blindados, foram de extrema relevância para se conhecer as características geomecânicas e propriedades físicas desses acessos, permitindo a qualificação do solo pela sua textura e plasticidade, além da investigação das propriedades de engenharia do solo. No entanto, os mesmos efetuaram-se após projeto inicial já em andamento, devido algumas preocupações com o cenário climático previsto.

Os ensaios de caracterização dos acessos, realizados posteriores a execução do primeiro projeto de blindagem foi importante para se identificar o solo das estradas de acesso, permitindo a avaliação das mesmas, afim de se definir os acessos cuja vias encontravam-se dentro dos parâmetros ideais (CBR= 80%), para tráfego, assim como aquelas que requeiram aplicação de pavimento para assim atender as condições ideais da pista de rolamento para o tráfego presente. Onde dos pontos amostrados, aproximadamente 81% apresentava CBR superior a 80%, ou seja, pelo método do CBR e carga de roda, não seria necessário pavimentar os trechos aos quais pertencem essas amostras.

Além dos ensaios realizados, a aplicação de ensaios complementares para determinação do módulo de resiliência dos materiais e de deformação permanente, seriam significativos para aprimoramento dos projetos de pavimentação.

6.3. ANÁLISE DOS MATERIAIS

Apesar de tratar-se de um projeto de pavimentação de estradas de minas, ao qual se aplicou uma metodologia para pavimentação rodoviária, os materiais propostos para o procedimento de blindagem de acesso, encontram-se dentro do grupo dos principais materiais utilizados para constituição de pavimentos, os materiais granulares, conforme literatura descrita nesse trabalho (Figura 32).

Figura 32 – Materiais das camadas de base e revestimento



a) Pedra-de-mão

b) Brita 3

c) Bica corrida

Fonte: Adaptado de VALE (2020)

A escolha do material entre gnaiss e os disponíveis nas próprias minas do Complexo Mariana, deram-se a partir da avaliação da abrasividade, através do ensaio de abrasão “*Los Angeles*”, e pelos custos envolvidos no processamento dos materiais do complexo. Nos ensaios de abrasão realizados nos materiais do Complexo, principalmente o itabirito compacto, apresentaram-se mais abrasivos que as rochas gnaisses propostas através do ábaco da Figura 15 (disponível no item 3.5.6), ou seja, menos resistentes à deformação quando sob atrito, consequentemente mais propensos ao fraturamento e/ou desgaste. Os resultados desse ensaio apresentaram o desgaste por abrasão do itabirito igual a 44,1% e para o gnaiss igual a 30,3%.

Para que se aplicasse o material da própria mina, seria necessário que esse material passasse por alguns processos de cominuição, o que envolveria custos significativos de infraestrutura e permanência desses processos. Logo foram definidos os seguintes materiais para composição do pavimento:

- Sub-base: itabirito (material encontrado no Complexo) ou gnaiss;
- Base: pedra-de-mão (material com dimensões entre 76 a 220 mm);

- Revestimento: brita “3” (material com dimensões entre 25 a 50 mm) e bica corrida (material com dimensões até 32 mm).

6.4. ANÁLISE DO MÉTODO DO CBR

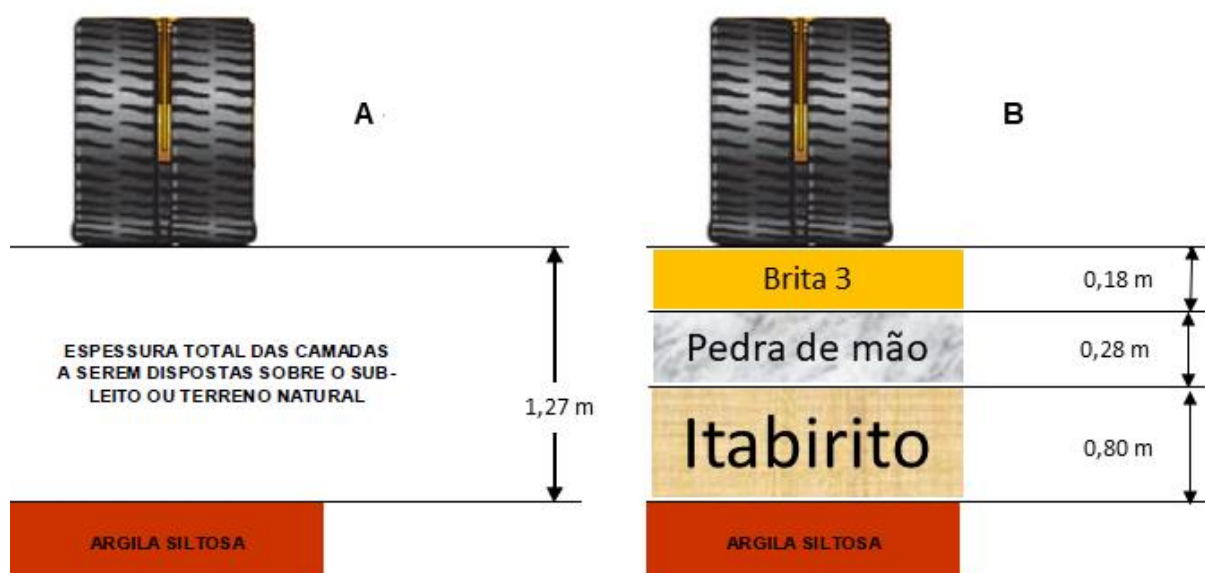
A Tabela 15 e a Figura 33 apresentam os materiais e as espessuras das camadas definidos a partir do método do CBR:

Tabela 15- Dimensionamento das camadas do pavimento do Complexo Mariana

F	Utilização no dimensionamento proposto	Material	CBR (%)
	Revestimento	Bica corrida	-
	Revestimento	Brita 3	80
	Base	Pedra-de-mão	50
	Sub-base	Itabirito	30
	Subleito	Argila	5

Fonte: Adaptado de VALE (2020)

Figura 33 - Camadas do pavimento



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

O método do CBR é um dos mais usuais, isso porque apresenta algumas vantagens consideráveis, como: metodologia simples, fácil utilização, resultados rápidos, boa previsibilidade para cargas pequenas (Figura 34). Oliveira *et al.* (2010b) ainda enfatiza que a aplicação desse método em estradas de mina é tida como viável, baseada em parâmetros técnicos, apresentando diretrizes que direcionam o projeto de dimensionamento das camadas do pavimento.

No estudo de caso apresentado nesse trabalho, o método do CBR demonstrou ganhos expressivos no que se refere a produtividade, meio ambiente, segurança. No entanto, de forma geral, alguns autores apontam algumas limitações do método CBR (MORGAN *et al.*, 1994 e THOMPSON e VISSER (1997) apud MASETTI *et al.*, 2011), em função dos seguintes aspectos:

- O método CBR baseia-se na Teoria da Elasticidade de Meios Homogêneos de Boussinesq, onde assume-se um módulo de elasticidade constante para todas as camadas, no entanto, uma estrutura de pavimento de mina consiste em diferentes materiais com propriedades específicas;
- o CBR não considera as propriedades do material de superfície, ou seja, do revestimento;
- a metodologia do CBR foi desenvolvida para estradas pavimentadas e em aeródromos, havendo grande diferença entre os parâmetros usados nesse tipo de estradas e os aplicados às estradas mineiras, portanto o método é menos aplicável em estradas não pavimentadas, principalmente, ao que diz respeito a geometria de estradas, aos materiais de construção e às características dos eixos dos equipamentos;
- as curvas empíricas propostas no ábaco, não foram desenvolvidas levando em consideração as cargas geradas por caminhões de grande porte, podendo a extrapolação simples levar a erros de sub ou superdimensionamento;

- o CBR é um método que foi originalmente desenvolvido para solos de clima temperado, sendo necessário algumas adaptações para regiões que apresentem outros tipos de clima.

O DNIT (2006) ainda salienta que a metodologia do CBR é empírica com base experimental referente a condições climáticas e de solos nos EUA, podendo-se até mesmo conduzir a um superdimensionamento, que explicar-se-ia pela ausência, no Brasil, da condição crítica correspondente ao degelo na primavera.

6.5. PROPOSTAS DE COMPLEMENTAÇÃO METODOLÓGICA PARA PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO

Considerando as limitações do método do CBR e as particularidades das estradas de mina, com base na pesquisa bibliográfica realizada para este trabalho, são levantadas algumas recomendações para a metodologia empregada no projeto de pavimentação de acessos, podendo ser em caráter complementar ou substitutivo.

Como o método do CBR não leva em conta as propriedades do material de revestimento, Sousa (2011) ainda sugere o uso desse método em conjunto com o método do DNER, já que o DNER “apresenta espessuras de revestimento determinadas empiricamente sobre camadas de base consideradas granulares” (SOUSA, 2011, p. 91).

Pode-se realizar a complementação do CBR, por modelos de previsibilidade de desempenho do tipo mecanístico-empírico, a fim de ampliar seu campo de aplicação e por estarem apoiados em propriedades mecânicas fundamentais do solo e materiais de pavimentação (DNIT, 2006).

Os modelos mecanístico-empírico, apresentam também outra vantagem, em relação aos modelos exclusivamente empíricos, eles permitem otimizar o dimensionamento da estrutura, tomando como base a capacidade de cada camada em resistir aos processos de deterioração provocados pelo tráfego, além de efetuar a consideração dos efeitos de camadas especiais intermediárias. Outro aspecto de notável relevância nos métodos mecanístico-empírico, é a caracterização apropriada do comportamento tensão-deformação

dos materiais sob o carregamento imposto pelo tráfego dos veículos, considerando-se o módulo de elasticidade ou “*Young*”, que se reveste das definições de módulo de deformação resiliente e o módulo de elasticidade efetivo “*in situ*” (DNIT, 2006).

A despeito da efetividade e usualidade do método CBR no Brasil, levando em consideração às mudanças nas características dos veículos, com maior número de eixos, maior volume de carga transportada e maior pressão de pneus utilizada nos caminhões, aliados aos fatores climáticos, tráfego e o desempenho estrutural dos materiais a serem empregados, tornou-se necessária a atualização na forma de dimensionamento de pavimentos. Agrupando-se esses aspectos, intrínsecos as estruturas do pavimento, foi desenvolvido em 2014 o Método MeDiNa. O método leva esse nome em homenagem ao professor Jacques de Medina, precursor da Mecânica dos Pavimentos no Brasil. MeDiNa é um novo método de dimensionamento nacional de pavimentos flexíveis do Brasil que foi oficializado pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), ele irá substituir o método empírico atualmente vigente no DNIT, o CBR. Com a implementação do MeDiNa, visa-se ampliação da vida útil do pavimento e, conseqüentemente, redução nos custos de manutenção (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2020).

O MeDiNa é um método mecanístico-empírico, que leva em consideração as tensões, deformações e deslocamentos de todo o pavimento, avaliando a deformação permanente das camadas e o dano por fadiga do revestimento e das camadas estabilizadas. Junto aos ensaios tradicionais de caracterização do solo do subleito e dos demais materiais granulares, cimentícios e asfálticos - a serem empregados na estrutura do pavimento - incluiu-se os ensaios de Módulo de Resiliência DNIT 134-2018 e Deformação Permanente DNIT 179-2018 (SUPORTE, 2021).

A resiliência “é a energia que, armazenada durante a deformação elástica do corpo, é devolvida ao cessarem as tensões causadoras dessa deformação” (VENESCAU, 2019?). Quanto maior a resiliência da camada, maior a capacidade dela resistir às tensões sem sofrer danos. Além de representar a resistência do solo às tensões, o módulo de resiliência também auxilia no cálculo de tensões e deformações nos diferentes regiões de um pavimento.

O MeDiNa realiza a análise dinâmica, considerando impactos sequenciais em todas as camadas do pavimento, simulando com mais fidelidade a realidade. Com base nisso foi desenvolvido um software, específico para essa finalidade, conhecido também como MEDINA. Segundo o DNIT, trata-se de um “programa computacional que realiza a verificação do dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico”, por meio da rotina de análise elástica de múltiplas camadas (VENESCAU, 2019?).

Métodos mecanístico-empírico demonstram-se como tendência de metodologia para dimensionamento de pavimentos não só rodoviários, mas também de estradas de mina, possibilitando a modelagem e simulação de diferentes cenários, segundo os diferentes parâmetros do projeto.

7. CONCLUSÕES

A análise bibliográfica e o estudo de caso, que fundamentaram esse trabalho, com objetivo de analisar a metodologia de dimensionamento de pavimentação de estradas do Complexo Mariana, ou seja, da blindagem dos acessos, permitiu observar ganhos significativos do método aplicado, como: aumento de velocidade no trecho blindado, redução na frequência de manutenções no acesso, redução/eliminação de ocorrências de atolamento em períodos chuvosos, redução da movimentação de material para acesso, controle da turbidez nos pontos de desaguamento da drenagem.

Os ensaios posteriormente realizados, para caracterização das estradas do Complexo, apresentaram-se de grande valia para evitar o superdimensionamento do pavimento de alguns acessos, permitindo conhecer melhor o subleito deles, não tomando como padrão os parâmetros mais conservadores, como ocorreu inicialmente no projeto.

No entanto, apesar da metodologia do CBR atender e apresentar algumas vantagens quanto ao projeto de pavimentação em vias mineiras, o mesmo não contempla algumas propriedades intrínsecas do empreendimento minerário, em especial, ao que diz respeito aos fatores geológicos, de infraestrutura e de logística, além dos métodos tradicionais serem baseados em conjunturas regionais adversas às do Brasil.

A ausência de metodologia específica para o dimensionamento de pavimentos de estradas de mina, em meio aos métodos tradicionais existentes para projetos de pavimentação, faz-se necessário aplicar metodologias que abranjam o máximo de parâmetros e aspectos relacionados as características e necessidades dos acessos de mina.

O estudo de caso mostrou que houveram ganhos em vários aspectos produtivos, econômicos, ambientais, todavia, o CBR apresenta pouca utilização de parâmetros experimentais de deformabilidade dos solos e dos materiais de pavimentação tipicamente brasileiros. Portanto, sugere-se a complementação do projeto, com análises que incluam, por exemplo, classificação da estrada de mina, módulo de resiliência do solo.

Por fim, para pesquisas posteriores recomenda-se a utilização de métodos mecanístico-empírico, como por exemplo o mais recente, o MeDiNa. A fim de

considerar as particularidades das estradas de acesso de mina, permitindo prever estruturas compatíveis com os reais cenários de uma mina. E um aprimoramento no desenvolvimento de modelos que permitam relacionar os parâmetros geomecânicos e físicos associados as estradas de mina.

REFERÊNCIAS

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B *et al.*. **Pavimentação Asfáltica – formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Associação brasileira das empresas distribuidoras de asfalto (ABEDA) - Gráfica Minister, 2007.

BLOG DA UNASP . **Pesquisa científica: a diferença entre exploratória, descritiva e explicativa**. [S. l.], 19 ago. 2019. Disponível em: <https://www.unasp.br/blog/pesquisa-cientifica-diferencas/>. Acesso em: 01 ago. 2021.

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

CATERPILLAR. **Caminhão de Mineração 789D**. 2011. 28 p. Disponível em: <https://docplayer.com.br/8676878-Caminhao-de-mineracao-789d.html>. Acesso em: 2 ago. 2021.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Coordenação-Geral de Comunicação Social - DNIT. **DNIT inicia procedimentos para transição do método de dimensionamento de pavimentos**. In: **DNIT inicia procedimentos para transição do método de dimensionamento de pavimentos**. [S. l.], 14 dez. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-inicia-procedimentos-para-transicao-do-metodo-de-dimensionamento-de-pavimentos>. Acesso em: 7 jul. 2021.

DRESCH, Fernanda. **Projeto de estradas**. 1. ed. Porto Alegre: SAGAH, 2018. ISBN 978-85-9502-304-8. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595023048/>. Acesso em: 18 Jun 2021

ENGENHARIA RODOVIÁRIA. **Conheça o Método de Dimensionamento Nacional – MEDINA**. 2019?. Disponível em: <http://engenhariarodoviaria.com.br/conheca-o-novo-metodo-de-dimensionamento-nacional-medina/>. Acesso em: 17 ago. 2021.

HUGO, D. **Haul road defect identification and condition assessment using measured truck response**. 2005. 109 f. Dissertation (Master of Engineering in the Department of Mechanical and Aeronautical Engineering) – University of Pretoria.

KOMATSU MINING SYSTEMS, INC. **Electric Drive Truck 730E**. Vernon Hills, IL, USA: 2001. Disponível em: <https://www.komatsu.com.br/source/catalogo.php?C-4-2>.

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

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Maura Maria Goretti de. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015. 640 p. ISBN 9788571933668. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/35661/pdf/0>. Acesso em: 7 jul. 2021.

MURRIETA, P. **Mecânica dos Solos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 9788595156074. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788595156074/>. Acesso em: 18 Jun 2021

OLIVEIRA FILHO, Waldyr. **Plasticidade dos solos**. 29-29 de jan de 2021. Notas de Aula.

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

PERONI, Rodrigo. **Projeto de estradas de mina: Aulas Práticas - Projeto Estrutural**. 2019?. Notas de Aula.

PITANGUI, LARA CORDEIRO. **Análise comparativa do Método do DNER com o Método mecanístico-empírico Medina**. 2019. MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II (ENGENHARIA CIVIL) - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, [S. l.], 2019. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/25932/1/2019_LaraCordeiroPitangui_tcc.pdf. Acesso em: 7 jul. 2021.

REINERT, Juliana et al. **Notas de aula - Práticas de laboratório: Mecânica dos solos e fundações**. Curvelo: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

REIS, MAÍRA DOS SANTOS. **Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra a céu aberto de minério de ferro dentro do quadrilátero ferrífero**. 2014. Dissertação (Mestre em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2014. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/4123>.

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

SEVERINO, R.O.. **Dimensionamento da produtividade de tratores D375A - 6 E D61EX- 23MO - Estudo de Caso: Complexo Mariana, Vale S.A.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Minas) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, ESCOLA DE MINAS, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS, [S. l.], 2018. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/856>.

SOUSA, LILIAN MASETTI LOBO SOARES DE. **Estudos de dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto**. 2011. Dissertação (Mestre em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2011. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/3283>.

SUPORTE (São Paulo). In: EQUIPE DE LABORATÓRIO. **Método MeDiNa – Conheça mais sobre o método e como se torna necessário realizar os ensaios dinâmicos**. [S. l.]: Equipe de laboratório, 17 mar. 2021. Disponível em: <https://www.suportesolos.com.br/blog/metodo-medina-conheca-mais-sobre-o-metodo-e-como-se-torna-necessario-realizar-os-ensaios-dinamicos/231/>. Acesso em: 7 jul. 2021

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

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

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. **Designing and Managing Unpaved Opencast Mine Haul Roads for Optimum Performance**. In: SME Annual Meeting, 1999, Denver, Colorado – USA. **Anais...** Colorado, 1999.

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

ANEXO B – CLASSIFICAÇÃO HRB

CLASSIFICAÇÃO GERAL		MATERIAIS DE GRANULAÇÃO GROSSA 35% ou menos passando na peneira 200							MATERIAIS DE GRANULAÇÃO FINA mais de 35% passando na peneira 200			
CLASSIFICAÇÃO POR GRUPO		A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7	
		A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 e A-7-6
Granulometria: porcentagem que passa na peneira												
10	50max			51min								
40	30max	50max										
200	15max	25max		10max	35max	35max	35max	35max	36min	36min	36min	
Característica da fração que passa na peneira 40:												
Limite de Liqueidez		6 max			40max	41min	40max	41min	40max	41min	40max	
Índice de Plasticidade		6 max		N.P.	10max	10max	11min	11min	10max	10max	11min	
Índice de Grupo		0		0	0			4 max	8max	12max	16max	
Tipos usuais de constituintes significativos dos materiais		Fragmentos de pedra, pedregulho e areia		Areia fina	Pedregulho e areia com silte e argila				Solos siltosos	Solos argilosos		
Comportamento como sub-leito		Excelente a bom				Regular a mau						
O Índice de Plasticidade do sub-grupo A-7-5 é igual ou menor que o LL - 30												
O Índice de Plasticidade do sub-grupo A-7-6 é maior que o LL - 30												