

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Geotecnia e Transportes

Elisa Zulmira Coelho Serafim

**UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NA CAMADA DE
REVESTIMENTO PRIMÁRIO EM ESTRADAS MINEIRAS**

Belo Horizonte

2024

Elisa Zulmira Coelho Serafim

**UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NA CAMADA DE
REVESTIMENTO PRIMÁRIO EM ESTRADAS MINEIRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Ronderson Queiroz
Hilário

Belo Horizonte

2024

S481u	<p>Serafim, Elisa Zulmira Coelho. Utilização do rejeito de minério de ferro na camada de revestimento primário em estradas mineiras [recurso eletrônico] / Elisa Zulmira Coelho Serafim - 2024. 1 recurso online (68 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Ronderson Queiroz Hilário.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 67-69. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Transportes - Teses. 2. Resíduos de mineração - Teses. 3. Minérios de ferro - Reaproveitamento - Teses. 4. Estradas - Teses. 5. Mina a céu aberto - Teses. 6. Revestimentos - Teses. I. Hilário, Ronderson Queiroz. II.. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 656(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

COLEGIADO DO CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

FOLHA DE APROVAÇÃO

**UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO COMO AGREGADO NO
DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE REVESTIMENTO PRIMÁRIO APLICADO A
ESTRADAS DE MINAS**

ELISA ZULMIRA COELHO SERAFIM

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração TRANSPORTES. Aprovada em 20 de dezembro de 2024, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Ronderson Queiroz Hilario - Orientador (UFMG)

Prof. Marcelo Franco Porto (UFMG)

Prof.^a. Marina Donato (UFSJ)

Prof. Daniel Pinto Fernandes (UFAL)

Belo Horizonte, 20 de dezembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Ronderson Queiroz Hilario, Chefe de departamento**, em 20/12/2024, às 14:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marina Donato, Usuária Externa**, em 02/01/2025, às 14:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Pinto Fernandes, Usuário Externo**, em 02/01/2025, às 18:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Franco Porto, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 06/02/2025, às 11:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3839460** e o código CRC **F33CC9FB**.

AGRADECIMENTOS

À Deus, fonte de toda sabedoria, agradeço por guiar meus passos no caminho do aprendizado. Reconheço que cada conquista vem da Sua graça e Seu cuidado comigo, por me dar a vida, a saúde e a força para concluir mais essa importante etapa da minha vida.

Ao meu marido, Eric, pelo companheirismo, paciência e suporte emocional nos momentos mais desafiadores, sendo minha inspiração de dedicação e esforço.

À minha mãe, pelo amor incondicional, pelas palavras de incentivo, pelo apoio constante e por ser um exemplo de determinação.

Aos meus amigos de longa data e aos novos que conquistei durante essa jornada, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio e motivação em todos os momentos, trazendo leveza e alegria para cada etapa desta caminhada.

Ao professor Ronderson, meu orientador, por sua paciência, dedicação e pelos ensinamentos que foram fundamentais para a realização deste trabalho. Sua orientação foi indispensável para cada etapa deste projeto.

À professora Marina Donato, pela ajuda e força nos momentos iniciais desta caminhada, incentivando-me a dar os primeiros passos rumo ao mestrado. Sua motivação foi essencial para que eu pudesse alcançar este objetivo.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pela excelência na formação acadêmica que me proporcionou e, em especial, a todos os professores e colaboradores do Programa de Pós-graduação em Geotécnica e Transportes, que desempenharam papel fundamental no meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço, em especial, à empresa Vale S.A., pelo financiamento do projeto, que viabilizou esta pesquisa, bem como pelo fornecimento dos recursos materiais necessários para sua realização.

Por fim, expresso minha gratidão à minha família e a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a conclusão desta etapa de aprendizado em minha vida.

“Não há nada bom nem mau a não ser estas duas coisas: a sabedoria
que é um bem e a ignorância que é um mal.”
(Platão)

RESUMO

SERAFIM, Elisa Zulmira Coelho. **Utilização de rejeito de minério de ferro como agregado no dimensionamento da camada de revestimento primário aplicado a estradas de minas**. 69f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

Em estradas de mina a céu aberto, é comum a utilização de materiais disponíveis na própria mina para a construção do pavimento. O estudo das propriedades dos materiais é indispensável para reduzir o surgimento de defeitos e otimizar os custos operacionais. A escolha dos materiais para as camadas estruturais do pavimento, pautada no uso de materiais disponíveis nas próprias minas, desempenha um papel crucial na durabilidade e no desempenho das vias. Neste contexto, esta dissertação realizou uma análise detalhada das propriedades físicas, mecânicas e mineralógicas das amostras coletadas na Mina do Segredo, por meio de ensaios laboratoriais. Metodologias empíricas de dimensionamento de pavimento foram utilizadas para determinar-se a espessura da camada de revestimento primário, aplicando os métodos CBR e DNIT. Foram ainda analisados os defeitos encontrados ao longo da superfície das vias e os agentes responsáveis por eles. Os resultados obtidos indicam que, apesar da manutenção frequente das vias e da aplicação de aspersão de água, as estradas da Mina do Segredo apresentam diversas irregularidades na superfície do pavimento, devido ao intenso tráfego de caminhões. A análise das propriedades dos materiais revelou que estes são mal graduados e desuniformes, o que compromete o processo de compactação e reduz a capacidade de suporte das camadas do pavimento. A composição mineralógica das amostras também indicou a presença de caulinita, o que pode afetar a estabilidade do material. Além disso, os métodos de dimensionamento utilizados, como o CBR e DNIT, mostraram-se inadequados para as condições específicas das estradas mineiras, evidenciando a necessidade de ajustes ou novos métodos para aprimoramento das práticas de dimensionamento de pavimentos.

Palavras-chave: estradas de mina; dimensionamento; revestimento primário.

ABSTRACT

On open pit mine roads, it is common to use materials available in the mine itself for pavement construction. The study of the properties of materials is essential to reduce the appearance of defects and optimize operating costs. The choice of materials for the structural layers of the pavement, based on the use of materials available in the mines themselves, plays a crucial role in the durability and performance of the tracks. In this context, this dissertation carried out a detailed analysis of the physical and mechanical properties of the samples collected at the Segredo Mine, through laboratory tests. Empirical pavement design methodologies were used to determine the thickness of the primary coating layer, applying the CBR and DNIT methods. The defects found along the surface of the roads and the agents responsible for them were also analyzed. The results obtained indicate that, despite the frequent maintenance of the roads and the application of water sprinkler, the roads of the Secret Mine have several irregularities in the pavement surface, due to the intense traffic of trucks. The analysis of the properties of the materials revealed that they are poorly graded and uneven, which compromises the compaction process and reduces the bearing capacity of the pavement layers. The mineralogical composition of the samples also indicated the presence of kaolinite, which can affect the stability of the material. In addition, the design methods used, such as the CBR and DNIT, proved to be inadequate for the specific conditions of Minas Gerais roads, evidencing the need for adjustments or new methods to improve pavement design practices.

Keywords: mine roads; sizing; primary lining.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
CAT – Caterpillar
CBR – *California Bearing Ratio*
CNU – Coeficiente de não uniformidade
CU – Coeficiente de curvatura
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DR – Taxa de geração de poeira
DRX – Difração de raios X
GC – *Grading coefficient* (coeficiente de graduação)
IA – Inteligência Artificial
IP – Índice de plasticidade
KB – Sub-base;
KR – Revestimento;
KRef – Reforço;
KS – Base;
LL – Limite de liquidez
LP – Limite de plasticidade
LS – Limite de contração
N – Número de solicitações correspondentes ao eixo padrão de 80kN (8,2 tf)
NRM – Normas Reguladoras de Mineração
ROM – *Run of Mine*
SP – Shrinkage product (produto de contração)
SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos
tp – Espessura do pavimento
TRB – *Transportation Research Board*
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
USACE – *United States Army Corps of Engineers*
VM – Volume médio diário de tráfego

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.2	Objetivos do trabalho	14
1.3	Estrutura da dissertação	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Estradas de mineração	16
2.2	Projetos de estrada	17
2.2.1	Geométrico	17
2.2.2	Funcional	18
2.2.3	Estrutural	19
2.3	Tipos de defeitos estradas não pavimentadas	20
2.4	Custos operacionais e eficiência do transporte.....	21
2.5	Classificação dos solos	22
2.5.1	Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).....	22
2.5.2	Transportation Research Board (TRB).....	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1	Considerações iniciais	26
3.2	Proposta de procedimento metodológico	26
3.3	Área de estudo e análise do pavimento existente	27
3.4	Coleta e ensaio dos materiais.....	28
3.4.1	Preparação das amostras	30
3.4.2	Análise granulométrica.....	31
3.4.3	Massa específica dos grãos.....	33
3.4.4	Limites de consistência.....	34
3.4.6	California Bearing Ratio (CBR).....	36
3.4.7	Caracterização mineralógica por difração de raios x.....	38
3.5	Seleção dos materiais.....	39
3.6	Dimensionamento do pavimento	40
3.6.1	Método do CBR.....	41
3.6.2	Método do DNER.....	42
4	Resultados e discussões	46
4.1	Análise do pavimento existente.....	46
4.2	Caracterização geotécnica das amostras.....	47
4.2.1	Massa específica dos grãos.....	47

4.2.2	Análise granulométrica.....	47
4.2.3	Limites de consistência.....	52
4.3	Caracterização mineralógica por difração de raios x.....	53
4.4	Classificação dos solos – Métodos TRB e SUCS	56
4.5	California Bearing Ratio (CBR).....	56
4.6	Seleção dos materiais.....	57
4.7	Dimensionamento do pavimento	60
4.7.1	Método do CBR.....	60
4.7.2	Método do DNER.....	61
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
5.1	Considerações finais	64
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A mineração pode ser definida como o processo de exploração, extração e beneficiamento de minerais ou compostos minerais de valor econômico presentes no subsolo, com o objetivo de atender às necessidades da humanidade. No Brasil, as principais regiões produtoras de minério de ferro incluem o Quadrilátero Ferrífero, a Província Mineral de Carajás e a região de Corumbá (SOARES, VOLL e CUNHA, 2018).

Na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, conhecida por suas riquezas minerais, foram identificados, no final do século XVII, minérios como ouro, ferro e manganês. Atualmente, essa região com uma extensão de cerca de 7.000 km², se consolida como a maior produtora de minério de ferro do país, abrangendo municípios importantes como Belo Horizonte, Ouro Preto, Congonhas e Itabira (ROESER e ROESER, 2010).

De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2022), o mercado de minério de ferro experimentou um crescimento acelerado nos últimos anos, com o faturamento saltando de R\$ 100,72 bilhões em 2017 para R\$ 339,15 bilhões em 2021. Esse crescimento impulsionou investimentos em pesquisa mineral e fomentou a criação de políticas públicas voltadas para uma mineração mais sustentável e segura.

No futuro, a criação e atualização de legislações mais rigorosas para regulamentar a mineração tornará ainda mais relevante o desenvolvimento de práticas eficientes e ambientalmente sustentáveis, conciliando os interesses de empresas mineradoras, governos e comunidades locais (HUSTRULID, KUCHTA e MARTIN, 2013).

Segundo Sousa (2011), a busca por competitividade leva as empresas a desenvolverem estratégias para reduzir custos e aumentar a produtividade. Na indústria mineral, o principal desafio é adotar novas tecnologias que melhorem os processos e apoiem a tomada de decisões, considerando fatores como: a redução da distância média de transporte, o aumento da quantidade de carga transportada, a melhoria da velocidade média dos veículos, a diminuição do consumo de combustível, o desgaste de pneus e a frequência de manutenção da frota, todos determinantes dos custos operacionais da mina.

Em minas onde a operação da lavra é realizada a céu aberto, o projeto e a manutenção das estradas de acesso são essenciais para assegurar o fluxo contínuo de veículos responsáveis pela movimentação de minério e estéril. Essa infraestrutura impacta diretamente as operações de carregamento, transporte e desgaste da frota, além dos custos operacionais gerais (PELLISSARI, 2019).

Assim, quando se busca a diminuição dos custos operacionais, as estradas desempenham um papel estratégico, conectando as frentes de lavra ao britador, às áreas de disposição de estéril, às praças de operação e aos pontos de escoamento da produção. Logo, identificar defeitos nas vias e implementar soluções adequadas é fundamental para preservar ou recuperar a integridade estrutural e funcional dessas estradas. Nesse contexto, o projeto de pavimento deve ser dividido em diferentes categorias: (a) projeto geométrico, (b) projeto estrutural, (c) projeto funcional e (d) projeto de manutenção (PELLISSARI, 2019; SILVA *et al.*, 2011).

O dimensionamento estrutural envolve a definição das espessuras das camadas que compõem o pavimento, tendo como propósito resistir e distribuir ao subleito os esforços gerados pelo tráfego e pelas condições climáticas. Diante disso, espera-se garantir o conforto e a segurança aos usuários. O dimensionamento deve considerar aspectos técnicos e econômicos nas etapas de implantação, operação e manutenção (MEDINA e MOTTA, 2015).

O desempenho estrutural dos pavimentos é influenciado por inúmeras variáveis, entender como essas influenciam no dimensionamento é essencial para o aumento da vida útil do pavimento. Entre as variáveis, Taskiran (2010) destacou, em seu estudo, a aplicação de inteligência artificial (IA) como ferramenta para identificar e modelar as inter-relações entre as propriedades do solo e o CBR. Nos últimos anos, diversos estudos têm se dedicado à análise da sensibilidade dos materiais às variações de umidade e à influência dessas mudanças nas propriedades mecânicas dos pavimentos (Cardoso *et al.*, 2023; Kern, 2022).

No dimensionamento de estradas em lavras a céu aberto, por circunstâncias técnicas e econômicas os materiais existentes na própria mina são utilizados na construção do pavimento que deve apresentar boa condição de rolamento, reduzindo vibrações e ruídos, possuir adequada capacidade de suporte e um sistema eficiente de drenagem para evitar danos ao subleito e à superfície de rolamento (SOUSA, 2011).

Por sua vez, o pavimento deve ser dimensionado considerando a capacidade de suporte da fundação sobre a qual o pavimento se assentará, o tráfego que deve compreender o volume e a distribuição das cargas por eixo, as propriedades físicas e mecânicas dos materiais a serem empregados na construção do pavimento e as condições climáticas (precipitação e temperatura).

Buscando compreender os efeitos das variações de espessuras das camadas e nos módulos dos materiais, Sousa (2011) propôs a avaliação do comportamento estrutural do pavimento pelos métodos CBR (California Bearing Ratio) e DNER (DNIT, 2006), obtendo praticamente a mesma espessura total para os diferentes métodos. Cabral, Barroso e Silva (2021) utilizaram o método empírico do CBR e dois outros métodos mecanístico-empíricos (MeDiNa e CAP 3D-D), para dimensionamento das camadas do pavimento, constatando redução no tempo de vida útil do pavimento quando analisado pelo método CAP 3D-D.

Dessa forma, com o objetivo de suprir a escassez de literatura específica sobre a infraestrutura de estradas de mina e explorar o comportamento do rejeito de minério de ferro como agregado na camada de revestimento primário, este trabalho analisa a eficiência do uso de métodos empíricos no dimensionamento das camadas do pavimento.

1.2 Objetivos do trabalho

Diante do exposto, o objetivo geral desta pesquisa tratando-se de vias não pavimentadas é proceder e comparar o dimensionamento da camada de revestimento primário de estradas de minas, utilizando os métodos empíricos do CBR e do DNER, empregando como matéria prima na substituição de agregados naturais o rejeito de barragens de minério de ferro.

Serão também objetivos desse trabalho:

- Caracterizar as propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas do rejeito de barragens de minério de ferro, avaliando sua viabilidade técnica para uso em revestimento primário;
- Avaliar a aplicabilidade do método empírico de dimensionamento para materiais compostos de rejeito de barragens de minério de ferro, quando utilizados como camada de revestimento, considerando aspectos técnicos;
- Comparar o dimensionamento da camada de revestimento primário do pavimento utilizando os métodos empíricos, DNIT (2006);

- Identificar limitações e vantagens técnicas no uso de rejeitos de barragens em revestimento primário, fornecendo subsídios para futuras pesquisas e aplicações práticas.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos. O Capítulo 1 tem como objetivo introduzir o tema abordado na dissertação, apresentando uma visão geral do tema e o contexto em que a pesquisa se insere. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura, visando identificar as lacunas no dimensionamento de pavimentos primários em estradas mineiras. No Capítulo 3, são descritos detalhadamente os procedimentos utilizados para a obtenção dos resultados. O Capítulo 4 apresenta, de forma clara os resultados obtidos em cada um dos ensaios e métodos aplicados. Por fim, o Capítulo 5 destaca os principais resultados dos ensaios e sugere possíveis direções para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Como resultado do crescimento da exploração mineral, o Brasil possui hoje 150 minas de minério de ferro em operação. Em virtude dos investimentos privados no setor, no ano de 2021, a produção foi de 567,77 milhões de toneladas, originadas, sobretudo, no estado de Minas Gerais, que contribuiu com 64% do total produzido no país (Anuário Mineral Brasileiro, 2023).

A otimização dos processos produtivos por meio da eficiência no transporte e operação está diretamente ligada à obtenção de resultados financeiros. Assim sendo, a infraestrutura das vias no interior das minas deve apresentar condições adequadas ao transporte de minério e estéril de um local para outro (CORDEIRO, 2022).

2.1 Estradas de mineração

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), define o revestimento primário como sendo a camada granular compactada aplicada sobre o subleito em rodovias não pavimentadas, com o objetivo de assegurar boas condições de rolamento. Deste modo, os materiais utilizados na execução do pavimento devem ser resistentes aos esforços verticais garantindo boas condições de trafegabilidade (DNIT, 2023).

Tendo como propósito a movimentação de massas, as estradas de acesso em lavras de mina a céu aberto devem estar sempre em boas condições para que os veículos e equipamentos trafeguem de maneira segura. Para Reis (2014), o bom desempenho do pavimento ao longo do tempo está correlacionado às etapas de projeto, construção, operação e manutenção. Quanto ao projeto para facilitar seu desenvolvimento o mesmo deve ser dividido nas seguintes fases:

a) Projeto geométrico: compreende o traçado e alinhamento das estradas, que devem ser projetadas seguindo as curvas naturais do terreno. Nesta etapa, identificam-se as características do veículo que trafegará pela via, o tipo de solo e o relevo da região. São estabelecidas, nesta fase, características como: largura da via, altura da berma, raio de curvatura, inclinação longitudinal e transversal da via;

b) Projeto estrutural: nesta etapa, são definidas as espessuras adequadas das camadas para resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais decorrentes da repetição de cargas de roda. O estudo das propriedades do material a ser utilizado para compor as camadas e o controle da compactação na fase de execução estão relacionados à durabilidade do pavimento e ao aparecimento de defeitos devido ao tráfego e às intempéries;

c) Projeto funcional: refere-se à seleção dos materiais que constituirão a superfície do pavimento, devendo garantir o conforto e a segurança aos usuários que trafegam sobre a via, além de estar diretamente ligado aos custos operacionais, bem como aos defeitos e irregularidades;

d) Projeto de drenagem: tem a função de eliminar e controlar o escoamento da água sobre a superfície da estrada, criando caminhos preferenciais para a mesma por meio de técnicas de inclinação transversal das vias, canaletas, canais, drenos e bueiros;

e) Manutenção: consiste em identificar a frequência ideal de manutenção, sendo um conjunto de operações realizadas para restabelecer as características técnicas do pavimento. Assim, uma vez que os defeitos prejudicam o conforto do usuário e podem originar danos aos veículos, a manutenção constante é essencial para evitar maior consumo de combustível e desgaste de pneus.

2.2 Projetos de estrada

Em razão da falta de padronização dos procedimentos a serem executados ao longo das etapas de projeto, construção, operação e manutenção de estradas de mina, adaptações baseadas em estudos detalhados são feitas, tendo como referência a literatura e, particularmente, a prática adquirida por meio de obras de construção rodoviária (CORDEIRO, 2022).

A Norma Regulamentadora da Mineração nº02 (NRM-02), considerando a necessidade de melhoria dos serviços técnicos, estabelece que, para o planejamento e desenvolvimento de minas a céu aberto, as mesmas devem ser projetadas de forma a promover a otimização das operações unitárias do setor mineral, atender às particularidades relativas à segurança operacional, do trabalho, controle ambiental e à reabilitação da via.

2.2.1 Geométrico

O projeto geométrico é, usualmente o ponto de partida para qualquer projeto de estrada de transporte de mina, sendo possível apenas após a compatibilização entre segurança e engenharia. Neste sentido, o Manual de Estradas de Mina (VALE, 2011) apresenta uma visão geral dos elementos geométricos cujo objetivo é produzir um projeto idealmente eficiente e seguro, fundamentado nas boas práticas de engenharia.

Conforme NRM nº13, são exigências para o transporte em minas a céu aberto: (i) largura mínima das vias de trânsito duas vezes maior que a largura do maior veículo utilizado, no caso

de pista simples, e três vezes, para pistas duplas; (ii) onde houver riscos de quedas de veículos devem ser construídas leiras com altura mínima correspondente à metade do diâmetro do maior pneu de veículo que por elas trafegue, sinalizadas para tráfego diurno e noturno, quando houver, e mantidas sempre em condições de uso (BRASIL, 2001).

Segundo as pesquisas desenvolvidas por Santos (2022), Oliveira e Aragão (2019) e Sousa (2011), cada estrada tem uma necessidade particular que varia conforme a região de implantação e sua função, além de características técnicas necessárias, especificamente fixadas pelas Normas do DNIT e NRM para as diferentes classes de projeto. Alguns dos elementos mais relevantes para o projeto geométrico de mina são listados abaixo.

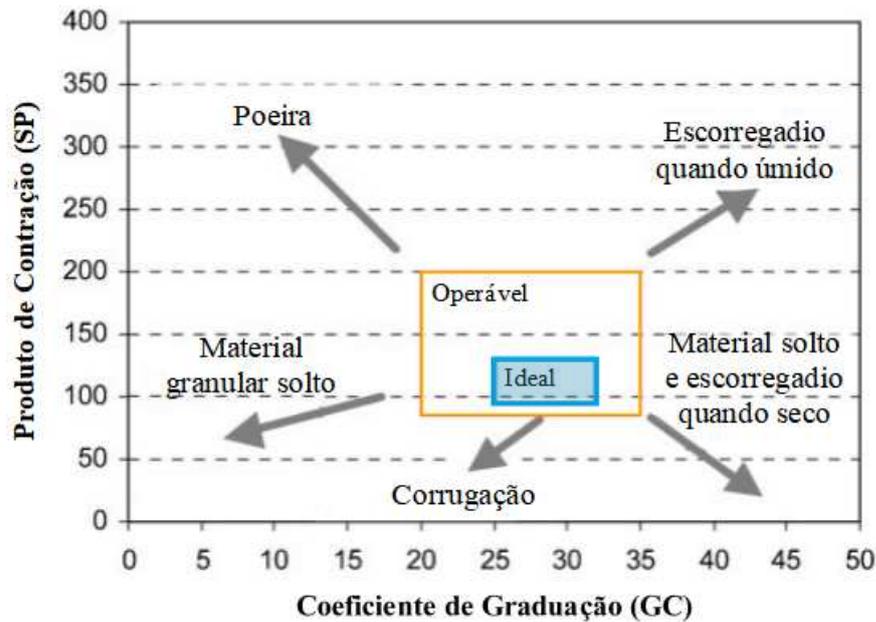
- Velocidade de projeto;
- Distância de parada;
- Distância de visibilidade;
- Raio de curvatura;
- Largura;
- Superelevação;
- Grade;
- Leiras de proteção;
- Interseções elementos geométricos.

2.2.2 Funcional

O projeto funcional de uma estrada de transporte refere-se ao processo de seleção dos materiais da camada de desgaste mais apropriada ou da mistura de materiais, normalmente cascalho natural, brita ou misturas de cascalho, proporcionais às considerações de segurança, operacionais, ambientais e econômicas (THOMPSON E VISSER, 2006).

Quanto à seleção ou combinação entre materiais a serem utilizados na camada de revestimento de estradas de transporte de minas, ainda segundo os autores, os aspectos funcionais dos mesmos devem estar inseridos entre os intervalos recomendados, obtendo-se assim uma superfície ideal, conforme Figura 2.1. Essa seleção está associada ao melhoramento da superfície, aumento da vida útil e redução de irregularidades ao longo da via.

Figura 2.1: Método de escolha dos materiais de revestimento.



Fonte: Adaptado de Thompson & Visser, 2006.

2.2.3 Estrutural

O pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um conjunto de camadas de espessuras finitas, compostas por materiais de diferentes resistências e deformabilidades, assentadas sobre um terreno de fundação designado de subleito, as quais devem resistir às deformações elásticas e plásticas induzidas pelas cargas impostas pelo tráfego de veículos (DNIT, 2006).

Durante a execução das camadas de base e sub-base, é indispensável que se faça o controle dos seguintes itens: (i) qualidade dos materiais; (ii) procedimento de execução, contemplando o espalhamento, a umidificação e a compactação; e (iii) controle tecnológico a fim de garantir que as camadas estejam de acordo com as especificações técnicas (PESSOA JÚNIOR, 2019). O controle de qualidade, quando realizado de maneira adequada, impede o aparecimento precoce de defeitos.

O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento. Os métodos de dimensionamento das camadas são divididos em métodos empíricos, semi-empíricos e empírico-mecanicistas.

- Métodos empíricos: são baseados na experiência e na observação considerando geralmente, apenas a resistência do subleito e o tráfego de projeto;
- Métodos empírico-mecanicistas: são desenvolvidos por um método de cálculo que utiliza ferramentas de análise de tensões e deformações, permitindo que os materiais sejam mais bem aproveitados.

No Brasil, o ensaio de CBR continua sendo amplamente utilizado devido à sua simplicidade de execução e ao baixo custo. Contudo, as condições de deformabilidade e o modo de ruptura apresentados nesse ensaio não refletem a realidade. Por essa razão, métodos mais modernos e adequados ao dimensionamento de pavimentos, que consideram as condições de tráfego, as características dos materiais e os efeitos climáticos, estão sendo gradualmente implementados. Esses métodos utilizam o módulo de resiliência dos materiais como parâmetro fundamental (MEDINA E MOTTA, 2006). Esses avanços buscam melhorar a precisão na avaliação da capacidade de suporte dos pavimentos, uma vez que o CBR, apesar de sua praticidade, limita-se a condições simplificadas que não capturam completamente as variáveis envolvidas.

Nesse contexto, buscando compreender os efeitos das variações de espessuras das camadas e nos módulos dos materiais, Sousa (2011) propôs a avaliação do comportamento estrutural do pavimento pelos métodos CBR (California Bearing Ratio) (DNIT, 2006) e DNER (1999), obtendo praticamente a mesma espessura total para os diferentes métodos. Cabral, Barroso e Silva (2021) utilizaram o método empírico do CBR e dois outros métodos mecanístico-empíricos (MeDiNa e CAP 3D-D), para dimensionamento das camadas do pavimento, constatando redução no tempo de vida útil do pavimento quando analisado pelo método CAP 3D-D. Esses estudos destacam a importância de adotar métodos mais avançados, que, ao levarem em conta a interação dinâmica entre os materiais, oferecem uma avaliação mais precisa da durabilidade e da eficiência dos pavimentos.

2.3 Tipos de defeitos estradas não pavimentadas

Para assegurar o desempenho e a qualidade das camadas do pavimento juntamente com a redução dos custos de manutenção, torna-se fundamental que seja realizada periodicamente a previsão do desempenho das estradas por meio do monitoramento da superfície de rolamento e o levantamento de defeitos, processos esses que visam o planejamento de manutenções periódicas (GONÇALVES E ESPINDOLA, 2020).

Para Oda (1995), os defeitos nas estradas são ocasionados pela união de fatores externos: o tráfego, a chuva e a manutenção, além de diversos outros fatores específicos ligados ao projeto funcional e à drenagem das estradas. Ainda segundo o mesmo autor, são comuns em estradas não pavimentadas os seguintes defeitos:

- a) seção transversal inadequada: avaliada pela facilidade de escoamento da água;
- b) drenagem lateral inadequada: verificada pela limpeza das valetas;
- c) ondulações: responsáveis pela vibração dos veículos;
- d) buracos: ocasionados pelo desprendimento das partículas de solo formando bacias na superfície da estrada;
- e) poeira: avaliada pela quantidade de material em suspensão após a passagem dos veículos;
- f) afundamento da trilha de rodas: resultante da baixa capacidade de suporte e pela deformação permanente das camadas;
- g) segregação de agregados: verificada pela formação de bermas no centro ou ao longo do acostamento da estrada.

2.4 Custos operacionais e eficiência do transporte

Em minas a céu aberto, as operações de carga e transporte são, em geral, efetuadas pela combinação de caminhões fora de estrada e escavadeiras. Entre as diversas operações realizadas numa mina a céu aberto, o transporte apresenta o custo operacional mais elevado, conseqüentemente, a avaliação das variáveis que influenciam o consumo de combustível torna-se indispensável para garantir a competitividade na indústria da mineração (RODOVALHO, LIMA & TOMI, 2016).

Três dos principais parâmetros que influenciam no custo operacional do transporte e na capacidade de produção em estradas de mina à céu aberto são: a carga média de transporte, os tempos fixos com manobras, carregamento e descarregamento e os tempos variáveis com distância e velocidade. Cabe destacar que, na maioria dos casos, a redução da velocidade é ocasionada por forças de resistência ao movimento que podem estar associadas às características do veículo, a superfície de rolamento, o dimensionamento das camadas e à geometria da via (SILVA, 2019).

Sendo assim, uma das principais conseqüências das alterações na superfície de estradas é o aumento do consumo de combustível, o desgaste dos pneus e a geração de vibrações em caminhões de transporte de minério de ferro, que contribuem para a redução da

competitividade. Segundo Thompson e Visser (2000), a escolha, o método de aplicação e a frequência de manutenção dos materiais da camada de revestimento são importantes, dado que a maioria das mineradoras consideram o custo por tonelada de material transportado como uma medida da eficiência do transporte.

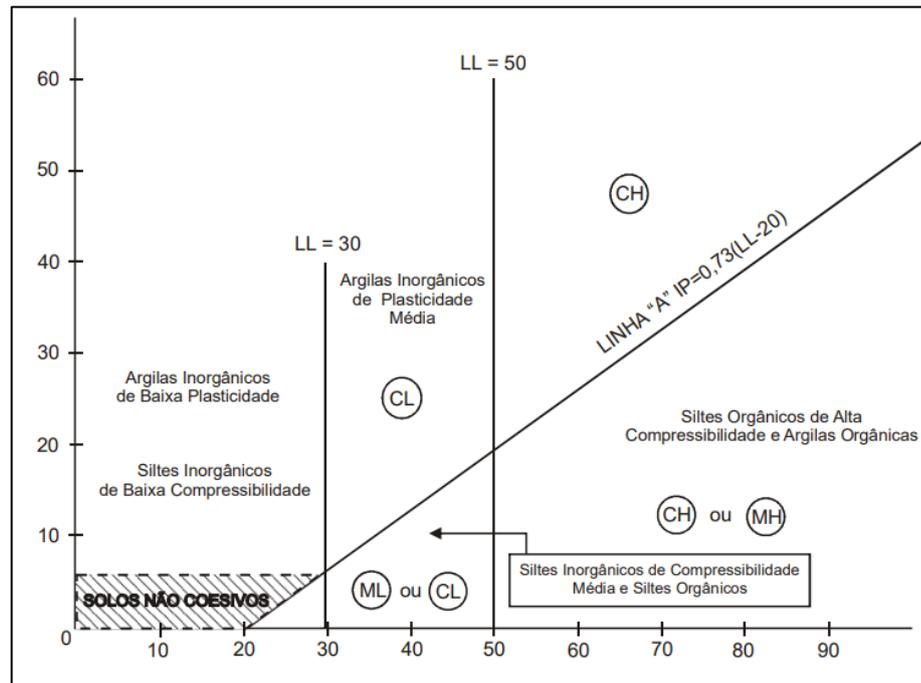
2.5 Classificação dos solos

2.5.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

Desenvolvido pelo professor Arthur Casagrande e detalhado na norma D2487 (ASTM, 2017). Esse método apresenta um sistema de classificação de solos baseado em suas principais características, como o tamanho das partículas, o limite de liquidez e o índice de plasticidade. A classificação SUCS é amplamente utilizada para fins qualitativos, permitindo a identificação do comportamento dos materiais para dimensionamento de pavimentos.

De acordo com o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), este método agrupa os solos de acordo com seu comportamento, com base em sua granulometria, limites de consistência, curva granulométrica e a presença de matéria orgânica. Os critérios utilizados na classificação SUCS incluem os percentuais de material passante pelas peneiras nº200 e nº4, além dos limites máximos e mínimos para o índice de grupo, presença de matéria orgânica e a linha “A”. Essa linha, ilustrada na Figura 2.2, representa a divisão entre as argilas tipicamente isentas de matéria orgânica e os solos plásticos contendo partículas orgânicas ou solos siltsos sem matéria orgânica.

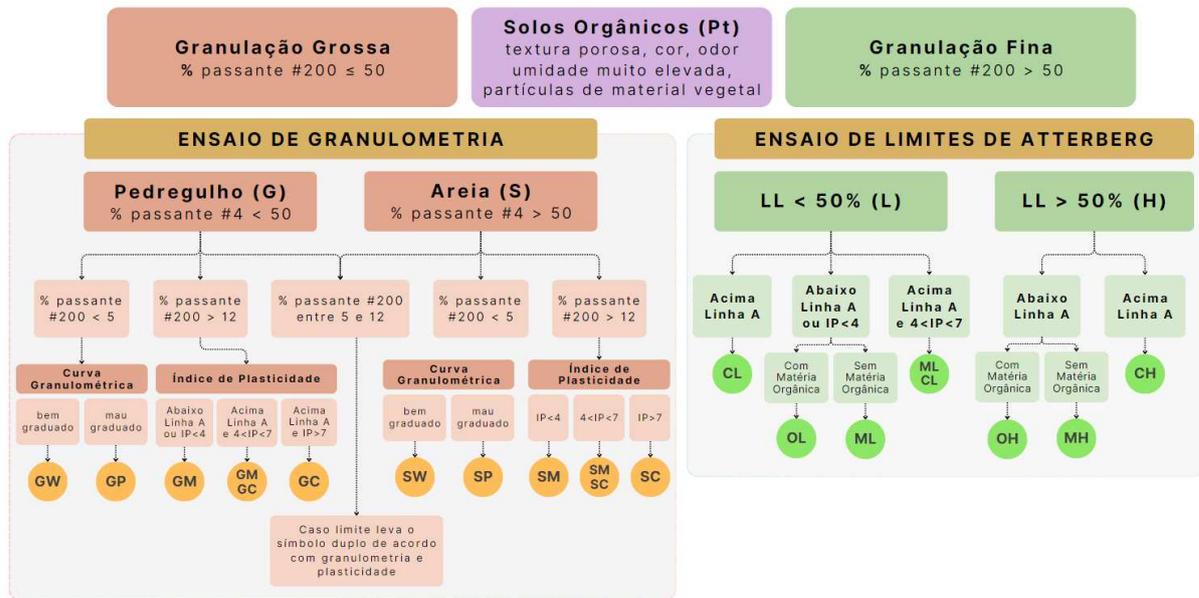
Figura 2.2: Sistema unificado de classificação de solos – gráfico de plasticidade.



Fonte: DNIT, 2006.

A classificação dos solos é organizada em três categorias principais: solos finos, solos grossos e solos altamente orgânicos, sendo subdividida de acordo com a curva granulométrica, o índice de plasticidade e o gráfico de plasticidade (Figura 2.2). Os solos de granulometria grossa são divididos em pedregulho e areia, enquanto os solos de granulometria fina são classificados conforme seu limite de liquidez, sendo agrupados em solos de baixo e alto limite de liquidez. O fluxograma apresentado na Figura 2.3 ilustra as etapas para identificação desses grupos de solos.

Figura 2.3: Fluxograma de classificação dos solos SUCS.



Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.

2.5.2 Transportation Research Board (TRB)

Este método agrupa os solos em categorias e subcategorias com base em sua granulometria, limites de consistência e índice de grupo (IG). Conforme Tabela 2.1, os critérios utilizados na classificação TRB incluem os percentuais de material passante pelas peneiras nº10, nº40 e nº200, além dos limites máximos e mínimos para o limite de liquidez, índice de plasticidade e índice de grupo. A classificação do solo é organizada em materiais granulares e silto-argilosos, dividindo-os em grupos conforme o comportamento do material como subleito, que pode variar de excelente a bom, ou de regular a ruim.

Tabela 2.1: Classificação dos solos TRB.

Classificação Geral	Materiais Granulares % passante #200 ≤ 35							Materiais Silto-argilosos			
Classificação em Grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria - % passante na peneira											
#10	50 máx.										
#40	30 máx.	50 máx.	51 min.								
#200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações iniciais

Este estudo foi desenvolvido em colaboração entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a empresa Vale S.A., com o objetivo de investigar o impacto das vibrações em caminhões fora de estrada utilizados no transporte de minério de ferro. A pesquisa concentrou-se na identificação das principais fontes de geração e transmissão de vibrações, considerando tanto os parâmetros relacionados aos subsistemas mecânicos dos caminhões quanto a qualidade do pavimento das estradas.

Para alcançar esse objetivo, o estudo contou com a coparticipação de diversos departamentos da UFMG, incluindo engenharia civil, mecânica e elétrica. Essa abordagem interdisciplinar busca proporcionar uma análise abrangente e integrada, combinando conhecimentos sobre comportamento estrutural, dinâmica de veículos e desempenho de pavimentos, visando mitigar os efeitos das vibrações e otimizar as condições operacionais das estradas e dos equipamentos utilizados.

A pesquisa faz parte de um grande projeto de longo prazo, que visa investigar e implementar melhorias nos processos logísticos da empresa, com foco na otimização da performance dos veículos e das vias de transporte. A contribuição da dissertação em questão representa uma pequena, mas significativa parte deste projeto, concentrando-se especificamente na análise do pavimento, oferecendo *insights* técnicos.

3.2 Proposta de procedimento metodológico

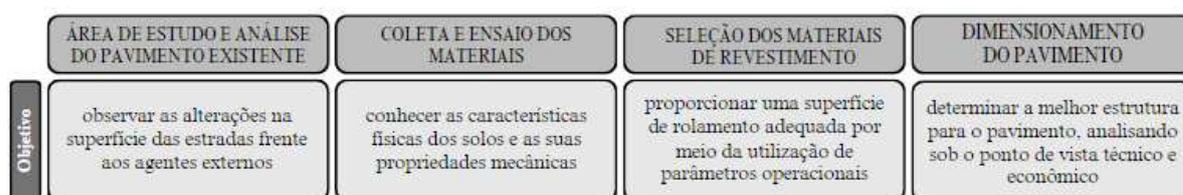
O capítulo em questão apresenta um estudo de caso desenvolvido para uma mina de minério de ferro a céu aberto, abordando o projeto estrutural de estradas. O foco principal é o dimensionamento da camada de revestimento primário, que desempenha um papel fundamental no transporte eficiente de minério por caminhões. A metodologia adotada para o estudo segue quatro etapas principais:

- i. **Definição da área de estudo e análise do pavimento existente:** Nesta etapa inicial, a região de interesse é delimitada e o estado atual do pavimento é avaliado, identificando possíveis falhas e condições que exijam melhorias;

- ii. **Coleta e ensaio dos materiais:** São realizadas coletas de amostras de solo e materiais disponíveis na região, seguidas por ensaios laboratoriais para caracterizar suas propriedades geotécnicas e mecânicas.
- iii. **Seleção dos materiais de revestimento:** Com base nos resultados dos ensaios, são escolhidos os materiais mais adequados para compor as camadas de pavimento, considerando critérios técnicos.
- iv. **Dimensionamento do pavimento:** A partir dos materiais selecionados, procede-se ao dimensionamento estrutural do pavimento, garantindo que ele suporte as cargas previstas durante o transporte de minério.

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma que sintetiza essas etapas, destacando o objetivo de cada uma e orientando a execução do estudo. Nas subseções seguintes, cada etapa será detalhada minuciosamente, considerando os métodos aplicados e os resultados obtidos.

Figura 3.1: Métodos utilizados neste trabalho com seus respectivos objetivos.



3.3 Área de estudo e análise do pavimento existente

O município de Ouro Preto, localizado na região central de Minas Gerais, integra o Quadrilátero Ferrífero, com uma população de cerca de 74.824 habitantes, uma área territorial de 1.245,865 km² e um PIB per capita de R\$ 50.312,19. O município de Ouro Preto está situado a 135 km de Belo Horizonte. Para o estudo de caso, foi selecionada uma via de acesso interna à área que compreende a Mina do Segredo, localizada próxima às Minas de Fábrica, João Pereira e Feijão, todas pertencentes ao complexo minerador de Itabira. A escolha da via foi baseada em sua relevância estratégica, caracterizada pelo alto fluxo de caminhões fora de estrada.

No contexto do sistema viário existente, observa-se que a execução das camadas de base e sub-base ocorre, na maior parte, sem um controle tecnológico adequado em campo que tenha como objetivo a garantia da qualidade, segurança e durabilidade do mesmo. O material originalmente solto é simplesmente lançado sobre a largura total da seção transversal correspondente ao leito da estrada e espalhado, com o auxílio de trator de lâmina e a motoniveladora. A compactação é realizada de forma rudimentar, sendo promovida pela passagem dos próprios caminhões fora

de estrada e pela umidificação da via, feita por caminhões-pipa. No entanto, o controle do teor de umidade é empírico, sem procedimentos técnicos rigorosos que assegurem a qualidade do pavimento.

A variação litológica, as características geométricas do terreno e a deficiência na compactação dos materiais têm gerado problemas na via que conecta a área 10 ao britador. Esses problemas são agravados pelas elevadas solicitações impostas pelo tráfego intenso de caminhões. Durante o estudo, foi realizada uma vistoria subjetiva nos trechos mais críticos, com o objetivo de identificar os defeitos que comprometem a segurança operacional e a produtividade dos equipamentos. Os principais problemas observados foram registrados para subsidiar o dimensionamento e a melhoria do pavimento.

3.4 Coleta e ensaio dos materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram coletados em trechos de importância estratégica e que apresentavam maiores inconformidades na Mina do Segredo Tabela 3.1. Para os ensaios laboratoriais, foram retiradas amostras deformadas dos materiais que compõem a base do pavimento dos trechos a serem analisados (Figuras 3.2 e 3.3). As coletas ocorreram em cinco pontos distintos, sendo as amostras identificadas como Ponto 01 (área 10), Ponto 02 (área 15), Ponto 03 (área 18), Ponto 04 (área 08) e Ponto 05 (britador).

Tabela 3.1: Pontos de coleta das amostras.

Amostra	Coordenadas		
	Norte	Leste	Datum
Ponto 01 (Área 10)	7.741.742,38	618.267,33	SAD 69
Ponto 02 (Área 15)	7.741.212,35	619.304,26	SAD 69
Ponto 03 (Área 18)	7.740.980,57	620.164,60	SAD 69
Ponto 04 (Área 08)	7.742.300,28	616.206,77	SAD 69
Ponto 05 (Britador)	7.741.769,84	616.712,74	SAD 69

Figura 3.2: Coleta de amostras Ponto 01, Ponto 02 e Ponto 03.

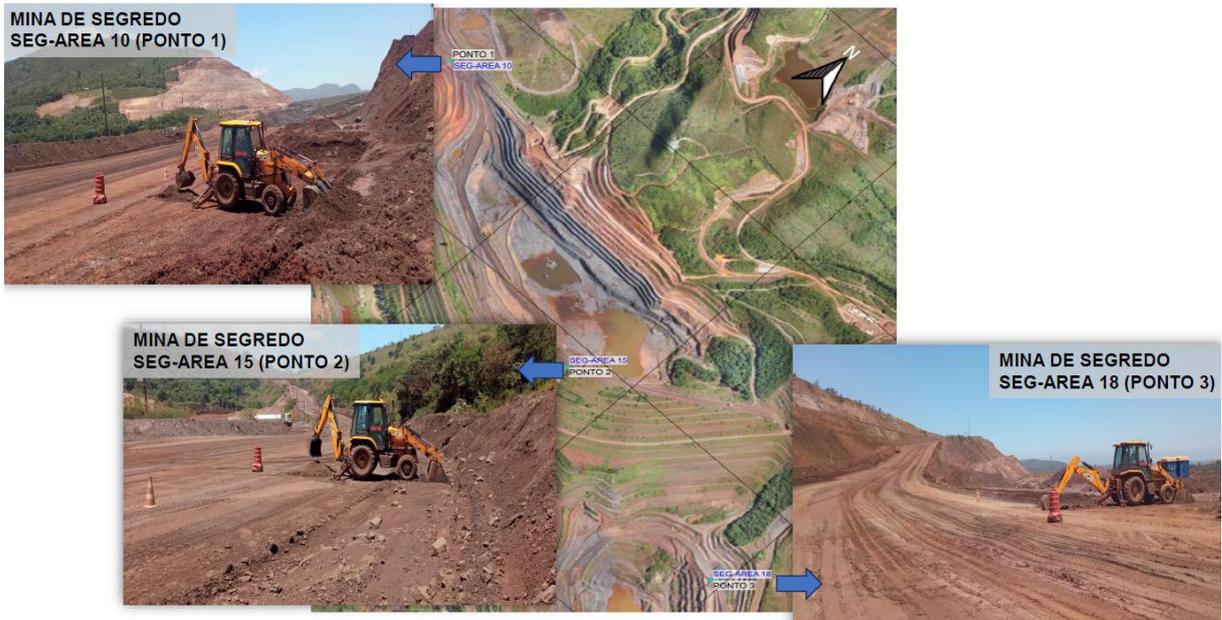
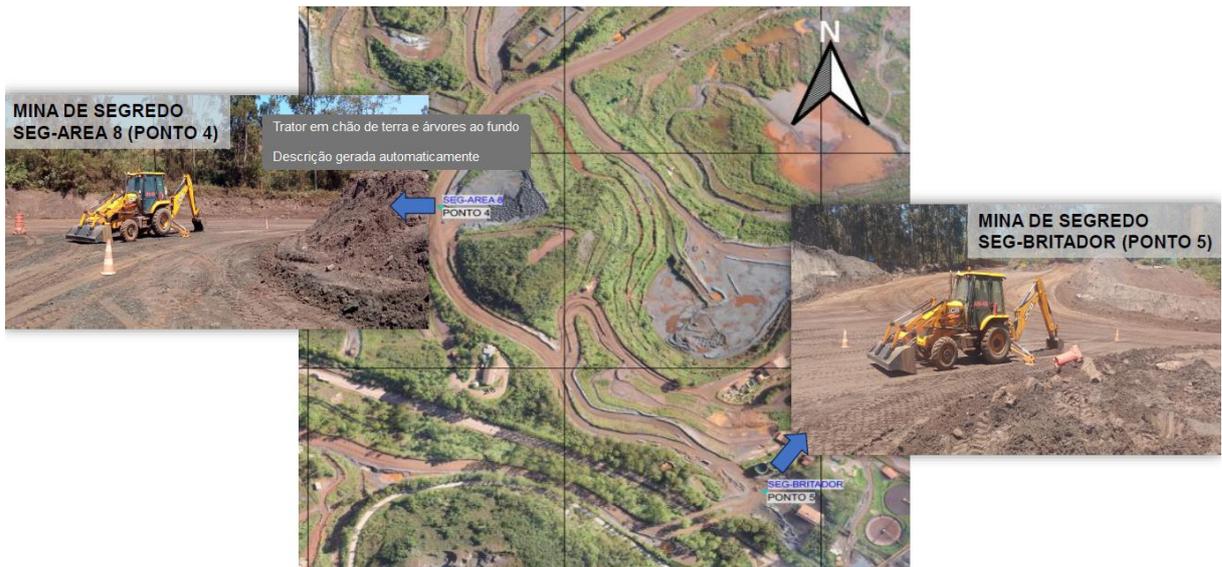


Figura 3.3: Coleta de amostras Ponto 04 e Ponto 05.



Cada amostra foi acondicionada em sacos plásticos com aproximadamente 20 kg e, posteriormente, armazenada em local seco e protegido das intempéries, garantindo a preservação de suas características para os ensaios, conforme ilustrado na Figura 3.4. A escolha desses pontos de coleta buscou representar adequadamente as condições dos materiais utilizados na base dos pavimentos nos trechos estudados.

Figura 3.4: Armazenamento das amostras.



Os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), enquanto o ensaio de difração de raios X foi conduzido no Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) da mesma instituição. Todos os procedimentos seguiram as normas técnicas estabelecidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), e pela American Society for Testing and Materials (ASTM). Foram executados os seguintes ensaios:

- Granulometria (NBR 7181/2020);
- Compactação (NBR 7182/2020);
- Índice de Suporte Califórnia (NBR 9895/2016);
- Limite de Liquidez (NBR 6459/2016);
- Limite de Plasticidade (NBR 7180/2016);
- Massa Específica dos Grãos (NBR 6458);
- Difração de Raio-X (DRX).

3.4.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras para os ensaios de caracterização foi realizada conforme as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 6457/2024, seguindo as etapas descritas a seguir:

- i. Secagem da amostra: A amostra de solo, recebida no laboratório, foi inicialmente seca em temperatura ambiente, permitindo a remoção da umidade excessiva;

- ii. Destorroamento: Utilizando um almofariz e uma mão de gral recoberta por borracha, as partículas de solo foram destorroadas, garantindo uma consistência homogênea e facilitando o processo de homogeneização da amostra;
- iii. Divisão da amostra: Após o destorroamento, o material foi dividido em quatro partes iguais, utilizando o método de divisão em quartéis. Esse procedimento visa obter uma amostra representativa, suficiente para a realização dos ensaios;
- iv. Preparação para os ensaios: A amostra foi então pesada, garantindo que o peso necessário para a execução dos ensaios de análise granulométrica, compactação, e limites de liquidez e plasticidade fosse alcançado.

Essas etapas asseguram que as amostras utilizadas nos ensaios de caracterização sejam representativas e adequadamente preparadas para garantir a precisão dos resultados.

3.4.2 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados é uma das principais características desses materiais, tendo influência direta no desempenho, na segurança e na durabilidade das vias. Para a determinação das dimensões das partículas presentes no solo e a quantificação das porcentagens em peso das diferentes frações, foi utilizada a ABNT NBR 7181/2018. O ensaio de granulometria foi dividido nas seguintes etapas:

- a) Peneiramento grosso: tomou-se uma mostra representativa de solo com aproximadamente 1000 g referente as amostras Ponto 01 a Ponto 05. As mesmas foram identificadas e passadas na peneira de 2,0 mm onde, a fração retida foi lavada para eliminar todo o material fino, logo após, o solo foi transferido para uma cápsula e seco a temperatura de 105 °C a 110 °C até a obtenção da constância de peso. Com o material obtido foi realizado o peneiramento grosso, utilizando o agitador mecânico e as peneiras de 50 mm a 4,8 mm. As massas retidas em cada peneira foram pesadas e anotadas;
- b) Sedimentação: quanto ao material passante na peneira de 2,0 mm, tomou-se cerca de 70g para os ensaios de sedimentação e peneiramento fino e cerca de 100g para a determinação da umidade higroscópica.
- c) O solo (70 g) foi transferido para um bequer, no qual foi adicionado defloculante e mantido em repouso durante 12h. Passado este tempo, o material foi transferido para o dispersor, e mantido em agitação por aproximadamente 15 minutos, em seguida, a mistura foi transferida para uma proveta e adicionada água destilada até a marca de 1000 ml. O material foi agitado na proveta durante 1 minuto, imediatamente após agitação, colocou-se a proveta

sobre uma mesa, anotou-se a hora e mergulhou-se cuidadosamente o densímetro fazendo-se as leituras de acordo com os tempos especificados para o ensaio de sedimentação;

d) Peneiramento fino: terminando o ensaio de sedimentação, o solo retirado da proveta, foi lavado na peneira de 0,075 mm e seco em estufa, à temperatura de 105 °C a 110 °C, até constância de massa. Utilizando o agitador mecânico, o material seco foi passado nas peneiras de 1,2 mm a 0,075 mm. Após vibração, as quantidades retidas em cada peneira foram pesadas.

• Cálculos

Para o traçado da curva de distribuição granulométrica das amostras, foi calculado a porcentagem de materiais que passam nas peneiras de 50 mm a 2,0 mm e porcentagem de materiais que passam nas peneiras de 1,2 mm a 0,075 mm, conforme Equações 3.1 e 3.2.

$$Q_g = \frac{(M_s - M_r)}{M_s} * 100 \quad (3.1)$$

Onde:

Q_g – é a porcentagem de material passado em cada peneira;

M_s – é a massa total da amostra seca (g);

M_r – é a massa do material retido acumulado em cada peneira (g).

$$Q_f = \frac{M_w * 100 - M_r(100 + W)}{M_w * 100} * N \quad (3.2)$$

Onde:

M_w – é a massa do material úmido submetido ao peneiramento fino (g);

M_r – é a massa do material retido acumulado em cada peneira (g);

W – é a umidade hidrocópica do material passado na peneira de 2,00 mm;

N – é a porcentagem de material que passa na peneira 2,00 mm.

a) Para a verificação da composição granulométrica através da determinação dos coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) dos solos, foram utilizadas as Equações 3.3 e 3.4.

- **Cálculos**

$$\text{CNU} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.3)$$

Onde:

D_{60} – é o diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas;

D_{10} – é o diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas.

$$\text{CC} = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (3.4)$$

Onde:

D_{30} – é o diâmetro abaixo do qual se situam 30% em peso das partículas.

3.4.3 Massa específica dos grãos

Para o cálculo da granulometria por sedimentação, é necessário conhecer a massa específica dos grãos do solo. Os ensaios para determinação da massa específica dos grãos de solo das amostras foram realizados, por meio de picnômetro, de acordo com a NBR 6458/2016, seguindo as etapas a seguir:

Após a preparação da amostra para o ensaio, foram utilizados cerca de 50 g de material para solos finos e 60 g para solos arenosos. A amostra foi imersa em água destilada por 12 horas. Em seguida, foi transferida para o copo de dispersão e submetida a agitação por 15 minutos. Posteriormente, a amostra foi colocada em um balão volumétrico, onde foi realizada a etapa de ebulição em chapa aquecida. Após esse processo, aplicou-se vácuo até a remoção total do ar aderido às partículas, adicionando-se água destilada até a marca de referência. Por fim, o conjunto (balão volumétrico + água + solo) foi pesado, e o ensaio foi repetido.

- **Cálculos**

O cálculo da massa específica dos grãos de solo foi obtido pela Equação 3.5:

$$\rho_s = \frac{M_1 * 100 / (100 + w)}{\left[M_1 * \frac{100}{100 + w} \right] + M_3 - M_2} * \rho_{w(T)} \quad (3.5)$$

Onde:

ρ_s – massa do solo úmido compactado (g);

M_1 – massa do solo úmido (g);

M_2 – massa do balão volumétrico + solo + água, à temperatura T de ensaio (g);

M_3 – massa do balão volumétrico cheio de água, à temperatura T de ensaio (g);

w – umidade inicial da amostra (%);

$\rho_{w(T)}$ – massa específica da água, à temperatura T de ensaio (g/cm^3).

3.4.4 Limites de consistência

A obtenção dos limites de consistência permite avaliar a divisão entre os estados líquido e plástico dos solos. As normas ABNT NBR 6459/2017 e ABNT NBR 7180/2016, foram utilizadas como ferramenta para realização dos ensaios de LL e LP, respectivamente.

a) Limite de liquidez: para execução do ensaio as amostras Ponto 01 a Ponto 05, foram preparadas e passadas na peneira de 0,42 mm. Colocou-se 70 g do material em um recipiente e homogeneizou-se com o acréscimo de água destilada, aos poucos, até a obtenção de uma massa plástica. O material foi transferido para a concha do aparelho de Casa Grande, obtendo uma espessura de aproximadamente 1 cm, na parte central da concha. Com o emprego do cinzel, foi aberta uma ranhura no solo, dividindo a massa do solo em duas partes. Colocou-se a concha do aparelho, procedendo, o golpeamento da concha contra a base do aparelho, até que as bordas inferiores da ranhura se unissem em 1,3 cm de comprimento, sendo registrado então o número de golpes. Transferiu-se, imediatamente, uma pequena quantidade do material das bordas que se uniram para um recipiente adequado para determinação de umidade. As operações foram repetidas 5 vezes para cada amostra e os resultados foram representados graficamente;

b) Limite de plasticidade: para execução do ensaio as amostras P1 a P5, foram preparadas e passadas na peneira de 0,42 mm. Colocou-se 50 g do material em um recipiente e homogeneizou-se com o acréscimo de água destilada, aos poucos, até a obtenção de uma massa plástica. Com a massa obtida, formou-se uma pequena bola, que foi rolada sobre uma placa de vidro esmerilhada, de modo a formar um cilindro de 3 mm de diâmetro por 10 cm de comprimento. Continuou-se a operação, até a obtenção das medidas desejadas e a fragmentação do cilindro, por perda de umidade. Imediatamente, foi transferido uma porção do cilindro para uma cápsula e determinou-se a umidade em estufa à temperatura de 105 °C a 110°C. Repetiu-se o procedimento até serem obtidos 3 valores de umidade.

Figura 3.5: Execução dos ensaios limite de liquidez e limite de plasticidade.



3.4.5 Classificação dos solos utilizados em pavimentação

Os ensaios de caracterização foram realizados para classificar as cinco amostras de solo segundo os sistemas de classificação TRB e SUCS. O índice de grupo (IG) do material de base foi calculado conforme a Equação 3.6.

$$IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd \quad (3.6)$$

Onde:

- a – porcentagem do material que passa na peneira nº 200, subtraído de 35;
- b – porcentagem do material que passa na peneira nº 200, subtraído de 15;
- c – valor do Limite de Liquidez, subtraído de 40;
- d – valor do Índice de Plasticidade, subtraído de 10.

O IG é um valor numérico inteiro, que varia de 0 a 20, e reflete duas características principais do solo: plasticidade e graduação das partículas do solo. Esse índice define a capacidade de suporte da camada de base, ou qualquer outra camada em estudo. A qualidade do material para uso em pavimentação é inversamente proporcional ao valor do IG, ou seja, quanto maior o IG, menor a qualidade do material.

3.4.6 California Bearing Ratio (CBR)

A fim de determinar os valores relativos ao Índice de Suporte Califórnia, das amostras deformadas de material coletado em campo foram seguidos os procedimentos descritos na norma DNIT ME 172/2016. Após preparação das amostras, elas foram passadas na peneira de 19 mm, identificadas e conservadas em sacos plásticos em quantidade suficiente para moldagem de cinco corpos de prova.

- **Primeira etapa: Compactação**

Com o objetivo de determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos compactados, o ensaio de compactação foi realizado conforme a norma ABNT NBR 7182/2016. Esse procedimento visa avaliar a influência da compactação no aumento da rigidez e resistência dos materiais ensaiados.

Inicialmente, o material foi colocado sobre uma bandeja metálica e umedecido gradualmente com água destilada, sendo cuidadosamente homogeneizado até alcançar um teor de umidade aproximadamente 5% abaixo do valor presumido como ótimo. Após a homogeneização completa, o molde cilíndrico foi fixado à base para dar início ao processo de compactação.

Na etapa de compactação, o material foi dividido em cinco camadas de espessura uniforme. Cada camada recebeu 55 golpes de compactação, aplicados de forma distribuída e uniforme sobre sua superfície, conforme a energia prevista no ensaio Proctor modificado. Ao finalizar a compactação da última camada, o molde cilíndrico foi removido de sua base, e o conjunto foi pesado para determinar o peso do material úmido compactado. Em seguida, uma amostra representativa do material excedente foi retirada para a determinação do teor de umidade. Essa amostra foi pesada e submetida à secagem em estufa até atingir constância de massa, possibilitando o cálculo do peso seco.

O procedimento foi repetido com incrementos de aproximadamente 2% no teor de umidade em cada ensaio. Foram obtidos cinco pontos na curva de compactação: dois no ramo seco, um próximo ao teor de umidade ótimo e dois no ramo úmido.

- **Segunda etapa: Expansão**

Após a moldagem realizada na etapa de compactação, o disco espaçador foi removido, os moldes foram invertidos e fixados novamente nas bases, juntamente com o colarinho. Sobre o

corpo de prova, foi posicionada a haste de expansão, à qual foram acoplados os pesos de 4,536 g. Na borda superior do cilindro, foi instalado um extensômetro, devidamente fixado a um tripé, para registrar as medições de expansão.

Os corpos de prova foram submersos em água por um período de quatro dias. Durante esse tempo, foi registrada a leitura inicial de expansão no extensômetro e, subsequentemente, as expansões ocorridas a cada intervalo de 24 horas. Ao final do período de imersão, os corpos de prova foram retirados da água e deixados em repouso por 15 minutos, permitindo o escoamento do excesso de água.

- **Terceira etapa: Penetração**

Após a etapa de expansão, o corpo de prova foi preparado para o ensaio de penetração. Para isso, o extensômetro, a haste e os pesos foram removidos, e o conjunto formado pelo cilindro e o solo foi transferido para a prensa. No interior do molde, os pesos de 4,536 g foram novamente posicionados. O pistão foi centralizado sobre o corpo de prova, e os extensômetros foram ajustados e zerados para iniciar as medições.

O ensaio foi conduzido acionando a manivela da prensa com uma velocidade de penetração controlada de 1,27 mm/min, aplicando inicialmente uma carga de aproximadamente 45 N. Durante o procedimento, as leituras registradas no extensômetro do anel de carga foram anotadas em função da penetração do pistão no solo e nos tempos determinados pelo protocolo do ensaio.

- **Cálculos**

a) O cálculo da massa específica aparente do solo seco compactado de cada corpo de prova foi obtido pela Equação 3.7:

$$\mu_h = \frac{P'_h}{V} \quad (3.7)$$

Onde:

P'_h – massa do solo úmido compactado (g);

V – volume do solo úmido compactado (cm³).

b) A massa específica aparente do solo seco compactado foi calculado pela Equação 3.8:

$$\mu_s = \mu_h * \frac{100}{100 + h'} \quad (3.8)$$

Onde:

P_h – massa do solo úmido (g);

P_s – massa do solo seco (g).

c) A expansão do solo foi obtida pela Equação 3.9:

$$\text{Expansão} = \frac{\text{leitura final} - \text{leitura inicial no extensômetro}}{\text{altura inicial do corpo de prova}} * 100 \quad (3.9)$$

d) O Índice de Suporte Califórnia foi obtido pela Equação 3.10:

$$\text{ISC} = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} * 100 \quad (3.10)$$

Com os resultados obtidos, foram traçados dois gráficos contendo a curva de compactação (peso específico aparente seco x umidade) e o resultado do Índice de Suporte Califórnia (pressão x penetração).

3.4.7 Caracterização mineralógica por difração de raios x

A técnica de Difração de Raios X (DRX) foi utilizada para a identificação da estrutura mineral das amostras, proporcionando resultados quantitativos e qualitativos. O processo de quantificação da quantidade de cada espécie mineral presente nas amostras foi realizado no Laboratório de Raios X do CPMTC-IGC da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), utilizando equipamentos e métodos especializados para garantir a precisão dos dados.

Os dados gerados durante a leitura das amostras no difratômetro foram coletados, processados e armazenados como difratogramas. Estes difratogramas foram então analisados, interpretados e caracterizados, permitindo a identificação das fases minerais presentes e a determinação de suas quantidades relativas nas amostras. O procedimento envolveu a comparação dos picos de difração observados com padrões conhecidos.

3.5 Seleção dos materiais

O critério de escolha do material a ser utilizado como camada de base e sub-base foi baseado em Thompson e Visser (2006), que utilizaram fatores operacionais como controle de poeira, resistência ao rolamento, quantidade de material solto, entre outros, na hipótese de estabelecerem diretrizes apropriadas para a seleção de materiais que compreenderão a camada de rolamento. Na Tabela 3.2 são apresentados os limites máximos e mínimos recomendados pelos autores para a seleção de materiais, de forma a retardar o aparecimento de defeitos no pavimento.

Os parâmetros GC e SP foram calculados conforme Equação 3.11 e 3.12 respectivamente.

$$GC = \frac{(P_{26,5} - P_2) * P_{4,75}}{100} \quad (3.11)$$

Onde:

$P_{26,5}$, P_2 e $P_{4,75}$ – são o percentual de material passante das peneiras de 26,5 mm, 2,0 mm e 4,75 mm, respectivamente (%).

$$SP = LS * P_{0,425} \quad (3.12)$$

Onde:

LS – Retração linear (pode ser estimado como metade do índice de plasticidade);

$P_{0,425}$ – é o percentual de material passante da peneira de 4,25 mm (%).

Tabela 3.2: Parâmetros recomendados para a seleção de materiais de revestimento.

Propriedade	Intervalo	Impacto na funcionalidade	
		Abaixo do recomendado	Acima do recomendado
Produto de contração (SP)	85-200	Escorregadio. Maior desprendimento de material granulado e corrugação	Aumento na geração de poeira e mais escorregadio quando úmido
Coefficiente de graduação (GC)	20-35	Maior desprendimento de material granular e corrugação	Maior desprendimento de material granular e mais escorregadio quando seco
Taxa de geração de poeira (DR)	0,4-0,6	Redução na geração de poeira. Maior desprendimento de material	Maior geração de poeira
Limite de liquidez (LL)	17-24%	Maior desprendimento de material granular	Reduz o potencial escorregadio. Tende a gerar poeira
Limite de plasticidade (LP)	12-17%		
Índice de plasticidade (%)	4-8%	Maior desprendimento de material granular	Escorregadio quando úmido. Tende a gerar poeira
CBR (AASHTO)	> 80	Trafegabilidade ruim quando úmido e baixa resistência à erosão	Resistência à erosão e maior trafegabilidade
Tamanho máximo da partícula (mm)	≤ 40	Facilidade de manutenção, boa trafegabilidade e sem danos aos pneus	Manutenção frequente, danos potenciais

Fonte: Adaptado de Thompson e Visser, 2006.

3.6 Dimensionamento do pavimento

As vias de acesso mineiras foram historicamente projetadas e construídas empiricamente, dependendo da experiência cotidiana. No entanto, com o aumento do tamanho dos caminhões, tornou-se difícil prever a eficiência das operações, o custo das operações e garantir a segurança dos colaboradores. Embora existam diversos métodos de dimensionamento de pavimentos, no Brasil, os métodos empíricos do CBR e do DNER ainda são os mais utilizados para o dimensionamento das camadas de base e sub-base, em virtude da facilidade de utilização dos mesmos no dimensionamento de pavimentos. Para o dimensionamento de uma estrada mineira situada na Mina do Segredo, as metodologias utilizadas são apresentadas nos itens a seguir.

3.6.1 Método do CBR

- **Primeiro passo: obtenção do CBR**

Os valores de CBR dos materiais encontrados no interior das dependências da Mina Segredo, foram obtidos conforme metodologia descrita no item 3.2.3.

- **Segundo passo: determinação da carga de roda**

Para a determinação da carga de roda que solicita o pavimento, considerou-se as características do veículo mais pesado que transita pelo trecho em estudo. Nesse contexto, o veículo de projeto adotado foi o caminhão fora de estrada modelo Caterpillar 785C (Figura 3.5), que possui uma carga útil nominal de 136 toneladas, peso bruto operacional de 249,48 toneladas e velocidade máxima carregado de 55 km/h.

Figura 3.5: Caminhão fora de estrada modelo Caterpillar 785C.



De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, quando carregados, esses veículos transmitem cerca de 67% da carga total ao eixo traseiro simples com rodagem dupla, equivalente a 167,152 toneladas, enquanto o eixo dianteiro simples de rodagem simples suporta uma carga de 82,33 toneladas, conforme indicado na Tabela 3.3. Assim, o maior carregamento por roda para o caminhão Caterpillar 785C corresponde aos pneus traseiros, que suportam uma carga individual de 41,79 toneladas cada.

Tabela 3.3: Determinação da carga máxima por pneu CAT 785C.

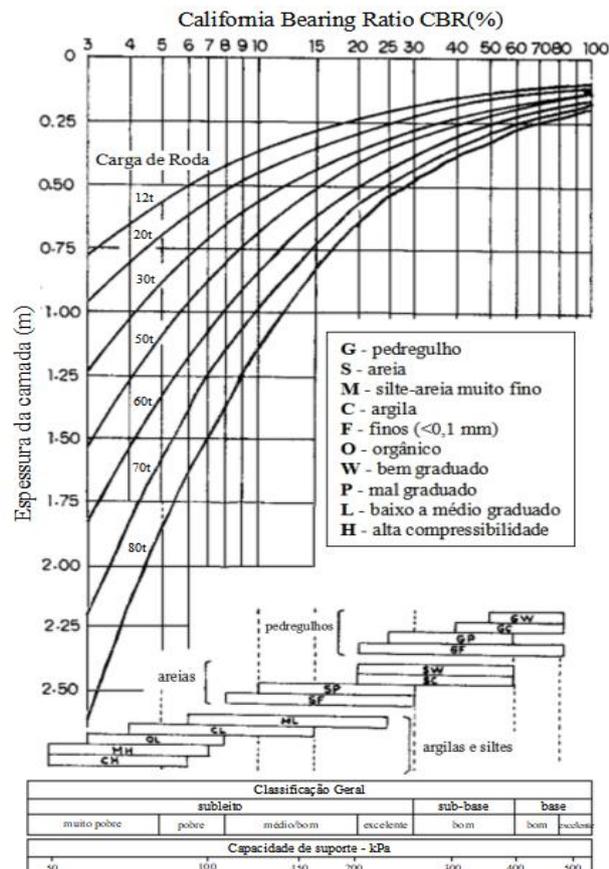
Modelo do caminhão	Peso bruto carregado (t)	Distribuição carregado (%)		Carregamento máximo por eixo (t)		Número de pneus		Carregamento máximo por pneu (t)	
		Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
785 C	249,48	33	67	82,33	167,15	2	4	41,16	41,79

Fonte: Adaptado de Sousa (2011).

- **Terceiro passo: determinação da espessura das camadas do pavimento**

A espessura total das camadas do pavimento para a mina em estudo foi obtida fazendo uso do ábaco da Figura 3.6, em função do tráfego que as mesmas devem suportar (carga de roda) e as características dos materiais coletados na própria mina e utilizados em pavimentação CBR.

Figura 3.6: Ábaco para dimensionamento das camadas do pavimento.



Fonte: Adaptado de Hustrulid, Kuchta e Martin, 2013.

3.6.2 Método do DNER

- Primeira etapa: seleção dos materiais

As camadas do pavimento de uma estrada de mina devem apresentar maior resistência e menor deformabilidade, quando solicitadas pelo tráfego de veículos, por questões técnicas e

econômicas, a estrutura de camadas deve ser composta por materiais granulares de diferentes resistências. A avaliação das propriedades mecânicas nos materiais foi obtida por meio dos ensaios laboratoriais CBR, mediante a moldagem de corpos de prova em laboratório utilizando a energia modificada de compactação.

Para seleção dos materiais, utilizou-se o método descrito no Manual do DNIT (2006), devendo as mostras ensaiadas apresentarem as seguintes propriedades:

- a) subleito: $CBR \geq 2\%$ e $expansão \leq 2\%$
- b) reforço do subleito: $CBR > CBR_{subleito}$ e $expansão \leq 1\%$;
- c) sub-base: $CBR \geq 20\%$ e $expansão \leq 1\%$;
- d) base: $CBR \geq 80\%$, $expansão \leq 0,5\%$; $LL \leq 25\%$ e $IP \leq 6\%$;

Os materiais destinados à base granular devem se enquadrar em uma das faixas granulométricas especificadas na Tabela 3.4, garantindo que atendam aos critérios de distribuição de tamanho de partículas e características necessárias para a resistência e durabilidade do pavimento.

Tabela 3.4: Faixas granulométricas para base granular.

Tipos Peneiras	Para $N > 5 \times 10^6$			Para $N < 5 \times 10^6$			Tolerância da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% passante						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
#4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
#10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
#40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
#200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.

Caso o material não se enquadre nas faixas granulométrica especificadas, as alternativas incluem a estabilização do material por meio da adição de aglomerantes ou outros materiais complementares, como cal ou cimento, ou a substituição parcial do material por outro mais adequado. Outra opção é utilizar uma combinação de materiais que possibilite atingir a granulometria desejada.

- Segundo passo: determinação do tráfego

Em estradas de mina a céu aberto, o deslocamento de minério e rejeitos são usualmente realizados por caminhões basculante e caminhões *run off mine* (ROM). O pavimento em estudo, foi dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo simples padrão com carga de 8,2 t. Para a obtenção do mesmo foram obtidos dados como a produção anual de minério, a movimentação de estéril anual, a vida útil prevista para o pavimento e o número médio de viagens por dia.

Visto que, os caminhões fora de estrada modelo CAT 785C, possuem carga útil nominal de 136 t e o peso bruto do veículo em operação é de 249,48 t. O número N foi calculado por meio da Equação 3.13 a seguir:

$$N = Vt * FE * FEC * FR \quad (3.13)$$

Onde:

Vt – volume total de veículos no período de projeto ;

FE – fator de eixos;

FEC – fator de equivalência de carga;

FR – fator climático regional.

- Terceiro passo: determinação da espessura total das camadas

O coeficiente de equivalência estrutural (k) adotado foi de 1,00 referente as camadas granulares. De acordo com Sousa (2011), devido a limitação de cargas imposta pelo método deve-se utilizar a Equação 3.14 para substituir as curvas do ábaco da Figura 3.7 e obter-se a espessura total do pavimento.

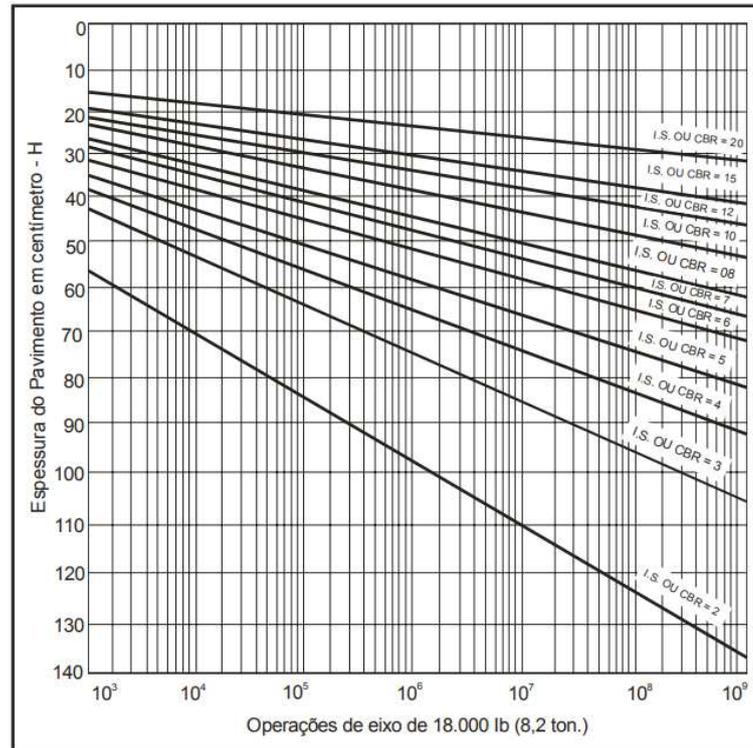
$$H_t = 77,67 * N^{0,0482} * CBR^{-0,598} \quad (3.14)$$

Onde:

N – Número de solicitações correspondentes ao eixo padrão de 8,2 tf;

CBR – California Bearing Ratio (%).

Figura 3.7: Determinação de espessuras do pavimento - DNIT.



Fonte: DNIT, 2006.

As espessuras de base (B) e sub-base (h_{20}) foram obtidas pela resolução sucessiva das Equações 3.15 e 3.16, a espessura da camada de reforço do subleito não foi considerada para este estudo.

$$RK_R + BK_B \geq H_{20} \quad (3.15)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S \geq H_n \quad (3.16)$$

Onde:

R – espessura do revestimento;

B – espessura da base;

H_{20} – espessura do revestimento + base;

h_{20} – espessura da sub-base;

H_n – espessura do revestimento + base + sub-base.

K_R, K_B e K_S – coeficiente estrutural do revestimento, base e sub-base.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise do pavimento existente

Ao longo da superfície do pavimento, foram identificadas diversas irregularidades, resultado da baixa capacidade de suporte das camadas dos materiais e da ausência de caracterização adequada do tráfego, especialmente no que diz respeito ao número de solicitações. Os tipos de defeitos observados neste estudo foram os seguintes:

- Segregação de agregados - Figura 4.1(a): os materiais granulares se desprendem da superfície de rolamento, formando faixas ao longo do acostamento;
- Drenagem lateral inadequada - Figura 4.1(b): identificada pelas valetas, que contêm grande quantidade de material granular, ocasionando empoçamento e comprometendo o direcionamento adequado das águas;
- Corrugações de baixa severidade: caracterizadas pelo aparecimento de sulcos regularmente espaçados, geralmente causados pela ação do tráfego e pela presença de material solto;
- Poeira - Figura 4.1 (c): observada na forma de nuvens de poeira pouco densas, provocadas pela ação abrasiva do tráfego, que faz com que as partículas se soltem da superfície de rolamento.

Figura 4.1 - Análise da camada de rolamento: defeitos.



(a) segregação de agregados

(b) drenagem lateral

(c) poeira

4.2 Caracterização geotécnica das amostras

4.2.1 Massa específica dos grãos

A massa específica dos grãos, obtida pela relação entre o peso das partículas sólidas e seu volume, é determinada em função dos tipos e proporção de minerais e argilominerais presentes na amostra, refletindo diretamente a composição mineralógica do solo. Na Tabela 4.1, são apresentados os resultados referentes à massa específica dos grãos do solo das amostras coletadas nos Pontos 01 a 05, evidenciando as variações associadas às características dos materiais analisados.

Tabela 4.1: Resultados massa específica dos grãos de solos.

Amostra	ρ_s (g/cm³)
Ponto 01 (Área 10)	3,01
Ponto 02 (Área 15)	3,17
Ponto 03 (Área 18)	2,88
Ponto 04 (Área 08)	2,95
Ponto 05 (Britador)	2,88

4.2.2 Análise granulométrica

Os resultados dos ensaios de caracterização granulométrica das amostras de base, encontram-se na Tabela 4.2 e ilustrados nas Figuras 4.2 a 4.5.

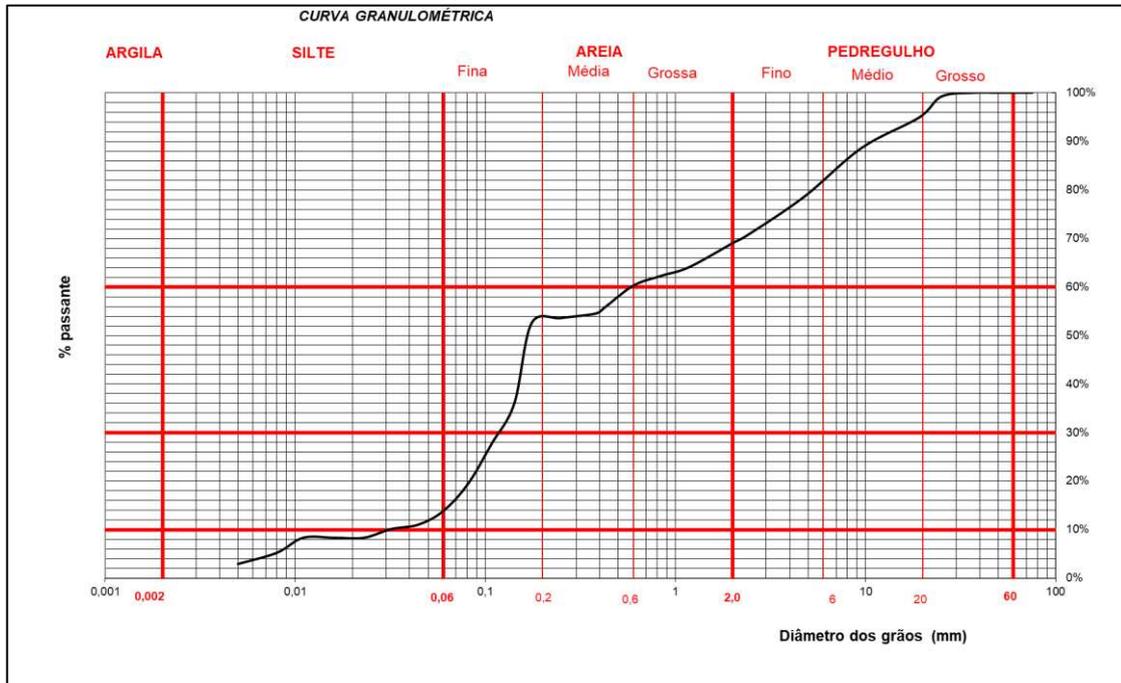
Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de caracterização granulométrica.

Amostra	Quantidade de material passante por peneira (%)									
	3/4"	3/8"	4	10	16	30	40	60	80	200
Ponto 01 (Área 10)	94,88	88,55	78,45	68,86	63,91	60,11	57,94	55,73	54,69	36,73
Ponto 02 (Área 15)	98,43	89,12	79,01	68,31	65,17	62,06	60,56	58,18	56,97	25,09
Ponto 03 (Área 18)	96,20	94,59	91,02	87,43	85,56	82,76	80,97	77,75	76,60	66,40
Ponto 04 (Área 08)	98,85	96,48	86,58	62,48	57,57	52,11	48,83	43,68	41,81	29,15
Ponto 05 (Britador)	74,35	58,79	48,21	39,47	35,66	32,11	30,22	27,48	26,54	18,57

- Ponto 01 – Área 10

A Figura 4.2, exibe a curva granulométrica do material de base coletado no Ponto 01 (Área 10).

Figura 4.2: Curva granulométrica – Ponto 01.



De acordo com Figura 4.2 e a Tabela 4.1, relacionadas ao material de base, concluiu-se que o material possui maior porcentagem na fração de areia e pedregulho. Para o cálculo dos parâmetros de uniformidade e curvatura do material, foram obtidos os valores de D10, D30, e D60, e estão apresentados na Tabela 4.2. Sendo a amostra mal graduada e desuniforme.

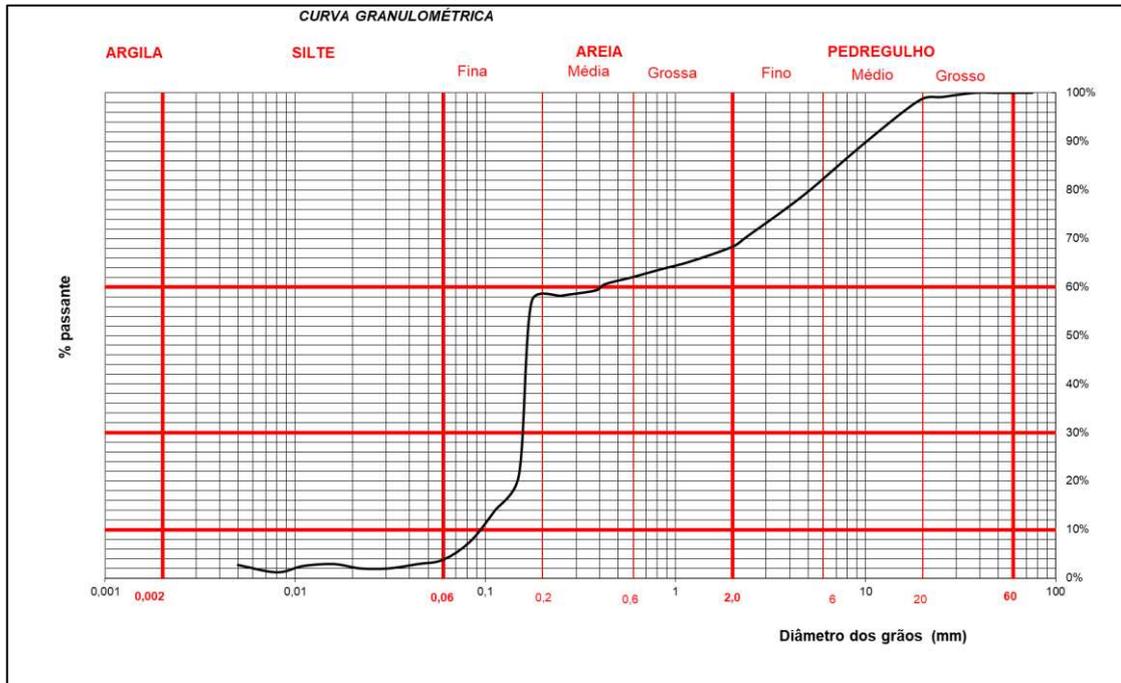
Tabela 4.2: Coeficiente de não uniformidade, coeficiente de curvatura – Ponto 01

Amostra	D10	D30	D60	CNU	CC
Ponto 01 (Área 10)	0,032	0,117	0,58996	19	0,74

- Ponto 02 – Área 15

A Figura 4.3, exibe a curva granulométrica do material de base coletado no Ponto 02 (Área 15).

Figura 4.3: Curva granulométrica – Ponto 02.



De acordo com Figura 4.3 e a Tabela 4.1, relacionadas ao material de base da Área 15, concluiu-se que o material possui maior porcentagem na fração de areia. Para o cálculo dos parâmetros de uniformidade e curvatura do material, foram obtidos os valores de D10, D30, e D60, e estão apresentados na Tabela 4.3. Sendo a amostra mal graduada e uniforme.

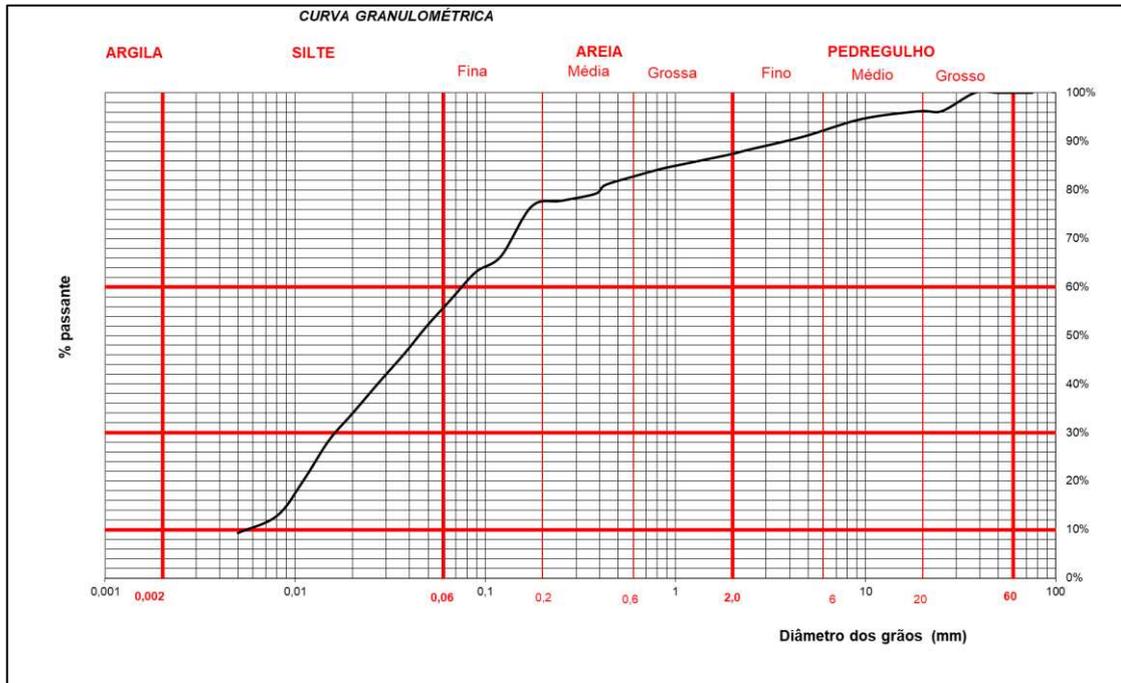
Tabela 4.3: Coeficiente de não uniformidade, coeficiente de curvatura – Ponto 02

Amostra	D10	D30	D60	CNU	CC
Ponto 02 (Área 15)	0,094	0,089	0,40536	4	0,21

- Ponto 03 – Área 18

A Figura 4.4, exibe a curva granulométrica do material de base coletado no Ponto 03 (Área 18).

Figura 4.4: Curva granulométrica – Ponto 03.



De acordo com Figura 4.4 e a Tabela 4.1, relacionadas ao material de base da Área 18, concluiu-se que o material possui maior porcentagem na fração de silte. Para o cálculo dos parâmetros de uniformidade e curvatura do material, foram obtidos os valores de D10, D30, e D60, e estão apresentados na Tabela 4.4. Sendo a amostra mal graduada e medianamente uniforme.

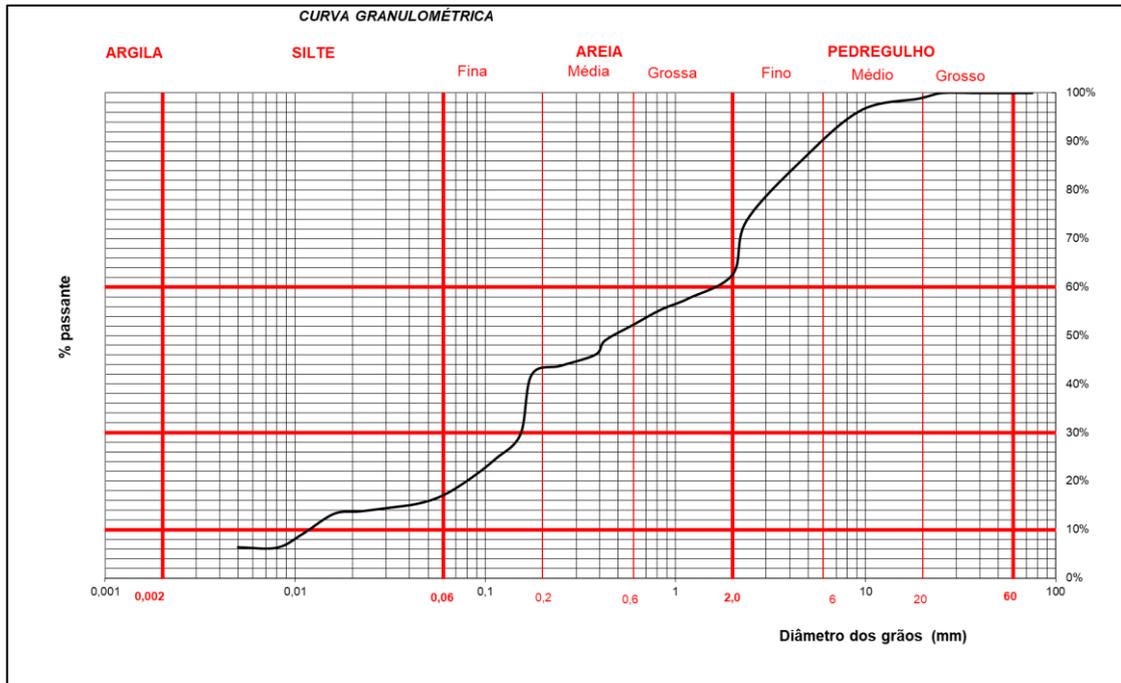
Tabela 4.4: Coeficiente de não uniformidade, coeficiente de curvatura – Ponto 03

Amostra	D10	D30	D60	CNU	CC
Ponto 03 (Área 18)	0,006	0,016	0,07627	14	0,64

- Ponto 04 – Área 08

A Figura 4.5, exibe a curva granulométrica do material de base coletado no Ponto 04 (Área 08).

Figura 4.5: Curva granulométrica – Ponto 04.



De acordo com Figura 4.5 e a Tabela 4.1, relacionadas ao material de base da Área 08, concluiu-se que o material possui maior porcentagem na fração de areia. Para o cálculo dos parâmetros de uniformidade e curvatura do material, foram obtidos os valores de D10, D30, e D60, e estão apresentados na Tabela 4.5. Sendo a amostra mal graduada e desuniforme.

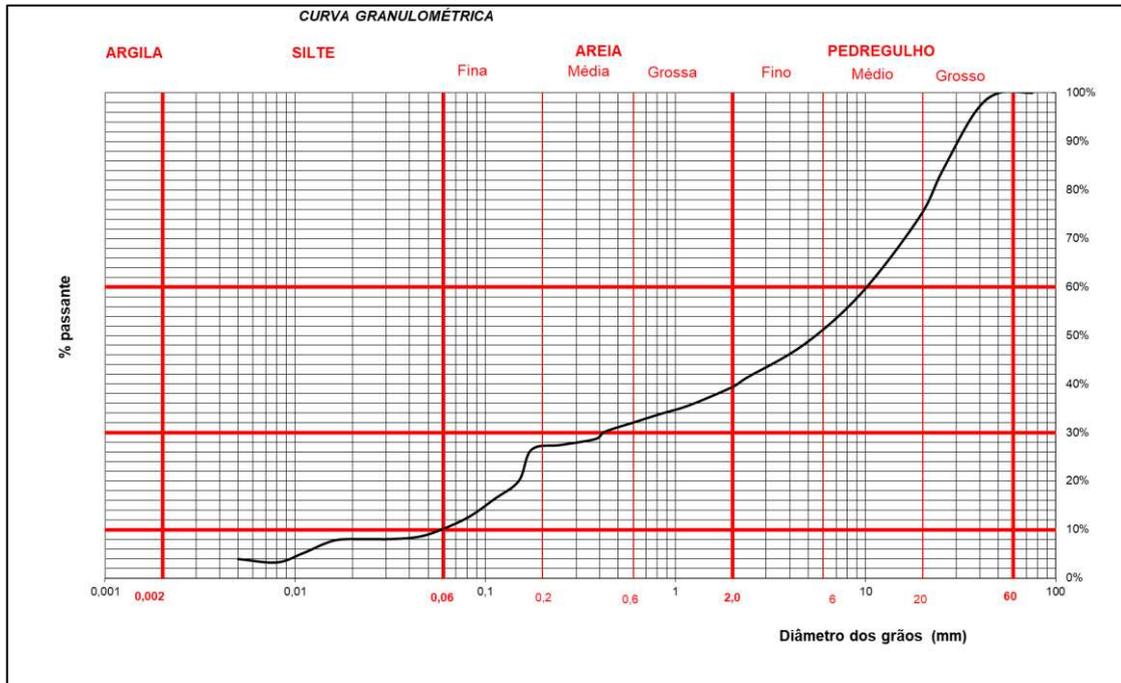
Tabela 4.5: Coeficiente de não uniformidade, coeficiente de curvatura – Ponto 04

Amostra	D10	D30	D60	CNU	CC
Ponto 04 (Área 08)	0,012	0,081	1,5568	130	0,35

- Ponto 05 – Britador

A Figura 4.6, exibe a curva granulométrica do material de base coletado no Ponto 05 (Britador).

Figura 4.6: Curva granulométrica – Ponto 05.



De acordo com Figura 4.6 e a Tabela 4.1, relacionadas ao material de base do Britador, concluiu-se que o material possui maior porcentagem na fração de pedregulho. Para o cálculo dos parâmetros de uniformidade e curvatura do material, foram obtidos os valores de D10, D30, e D60, e estão apresentados na Tabela 4.6. Sendo a amostra mal graduada e desuniforme.

Tabela 4.6: Coeficiente de não uniformidade, coeficiente de curvatura – Ponto 05

Amostra	D10	D30	D60	CNU	CC
Ponto 05 (Britador)	0,058	0,418	10,2449	176	0,29

4.2.3 Limites de consistência

Todas as amostras estudadas são consideradas não plásticas, o que é justificável, pois os solos coletados ao longo da via, são compostos predominantemente por partículas de areia e pedregulhos. Esses componentes, devido ao seu tamanho e forma, conferem aos materiais uma baixa capacidade de deformação plástica, resultando em uma rigidez característica.

4.3 Caracterização mineralógica por difração de raios x

Os difratogramas obtidos por meio das análises qualitativas de difração de raios X (Tabela 4.7) indicam a presença predominante dos minerais quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3) na composição da maioria das amostras, totalizando mais de 70% da composição mineral da rocha. A única exceção é a amostra Ponto 03, na qual esses dois minerais representam apenas 44,9% da sua composição total, ocorrendo uma maior concentração de caulinita (55,1%).

Tabela 4.7: Composição mineralógica dos solos – Ponto 01 a Ponto 05.

Minerais	Amostra (%)				
	Ponto 01	Ponto 02	Ponto 03	Ponto 04	Ponto 05
Hematita	59,4	31,0	21,8	32,1	40,6
Quartzo	19,0	43,4	23,1	48,2	28,0
Goethita	11,8	8,6	-	-	10,4
Gibbsita	9,8	-	-	-	-
Caulinita	-	17,0	55,1	17,2	21,0
Mica (moscovita)	-	-	-	2,5	-

As amostras dos Pontos 01, 02 e 04 (Figuras 4.7, 4.8 e 4.9) se destacam como as opções mais adequadas para aplicação em pavimentação, especialmente em camadas de base e sub-base. A elevada presença de quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3) nesses pontos confere ao material características fundamentais para pavimentos, como alta resistência mecânica, excelente durabilidade e resistência ao desgaste por abrasão, essenciais para suportar tráfego pesado.

Figura 4.7: Difratograma de raios X da amostra Ponto 01 (Área 10).

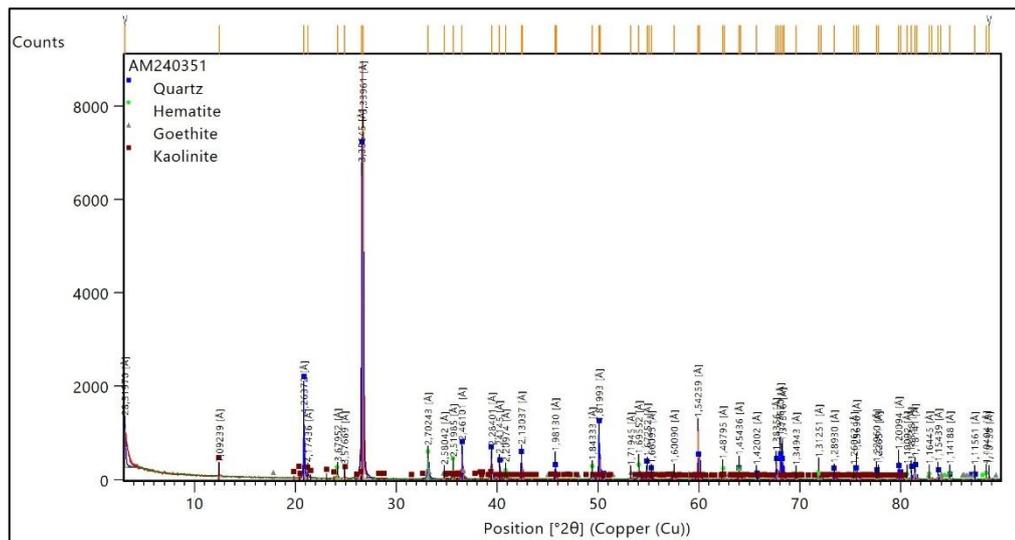


Figura 4.8: Difratoograma da amostra Ponto 02 (Área 15).

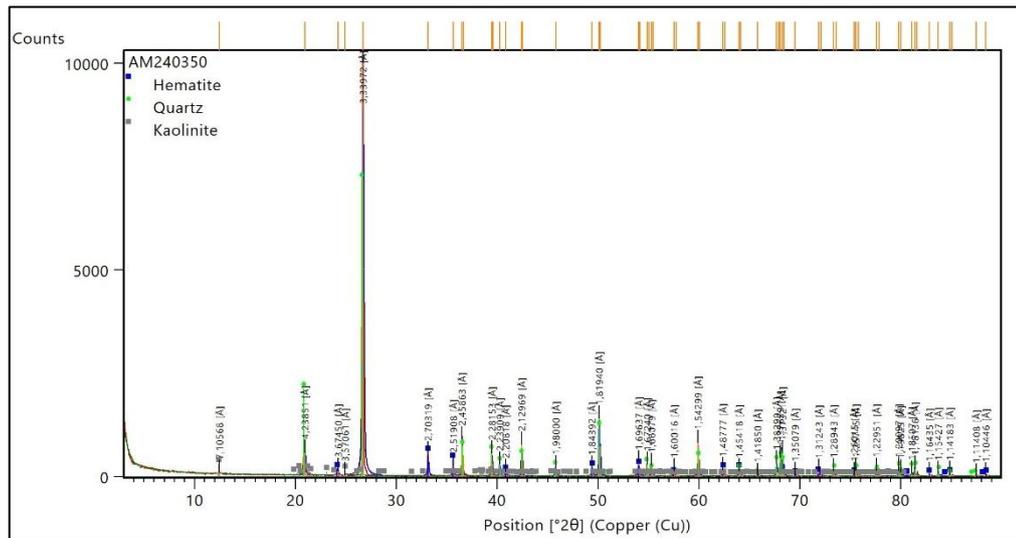
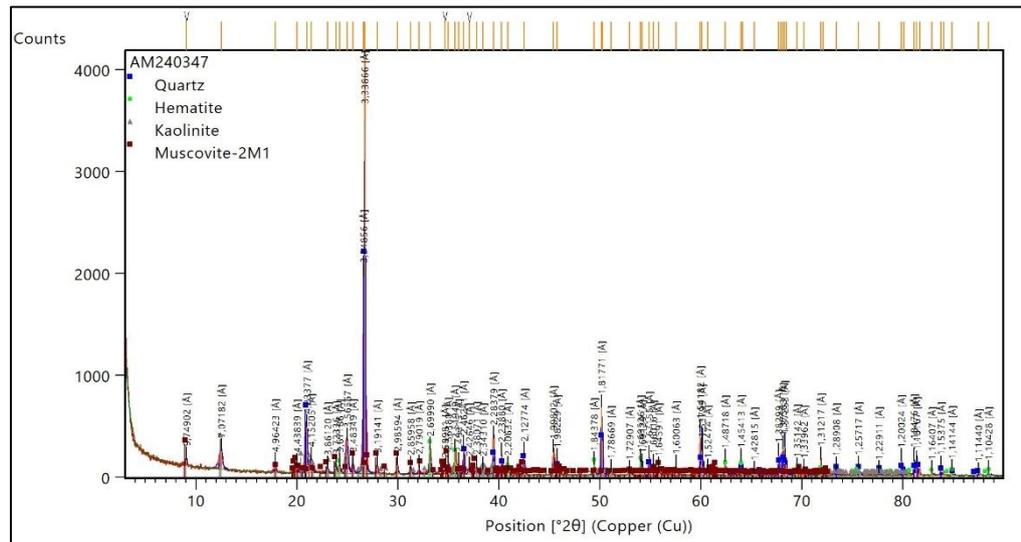
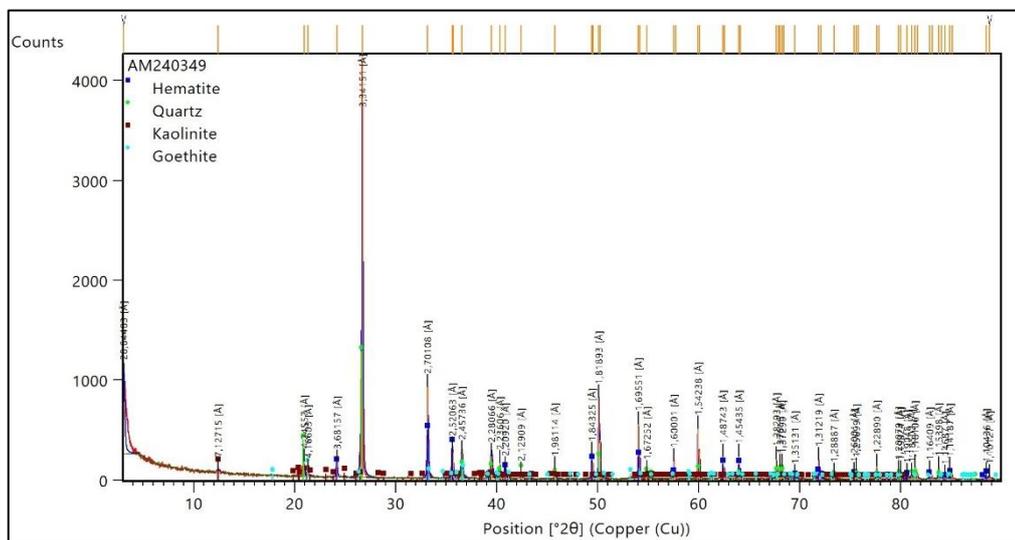


Figura 4.10: Difratograma da amostra Ponto 03 (Área 18).



Por outro lado, a amostra do Ponto 05 (Figura 4.11) apresenta aptidão para uso em camadas de sub-base, porém exige cuidado, especialmente em ambientes com alta umidade ou em situações de tráfego muito intenso, já que esse mineral pode comprometer a estabilidade e a resistência do material.

Figura 4.11: Difratograma da amostra Ponto 05 (Britador).



4.4 Classificação dos solos – Métodos TRB e SUCS

Com os resultados obtidos dos ensaios de granulometria, limites de liquidez, índice de plasticidade e o cálculo do IG, dispõe-se dos dados necessários para a classificação das amostras de solo de acordo com as metodologias TRB e SUCS. A Tabela 4.8 apresenta a classificação obtida para todas as amostras.

Tabela 4.8: Classificação dos solos, metodologias TRB e SUCS.

Amostra	% passante nas peneiras				LL (%)	IP (%)	IG	TRB	SUCS
	4	10	40	200					
Ponto 01 (Área 10)	78,45	68,86	57,94	36,73	NL	NP	0	A-4	SM
Ponto 02 (Área 15)	79,01	68,31	60,56	25,09	NL	NP	0	A-2-4	SM
Ponto 03 (Área 18)	91,02	87,43	80,97	66,40	NL	NP	6	A-4	ML
Ponto 04 (Área 08)	86,58	62,48	48,83	29,15	NL	NP	0	A-2-4	SM
Ponto 05 (Britador)	48,21	39,47	30,22	18,57	NL	NP	0	A-2-4	GM

Verifica-se que, de acordo com a classificação TRB, as amostras Ponto 02 (Área 15), Ponto 04 (Área 08) e Ponto 05 (Britador) pertencem ao subgrupo A-2-4, apresentando um comportamento que varia de excelente a bom. Em contraste, as amostras Ponto 01 (Área 10) e Ponto 03 (Área 18), que pertencem ao subgrupo A-4, exibem um comportamento que vai de sofrível a mau.

A metodologia SUCS é utilizada para classificar os solos com base em suas características de granulometria e plasticidade. Para todas as amostras, os resultados NL e NP indicam que todos os solos analisados possuem comportamento característico de materiais não coesivos. As amostras dos Pontos 01 (Área 10), 02 (Área 15) e 04 (Área 08) foram classificadas como SM – areia siltosa, apresentando propriedades insignificantes de expansão e contração. A amostra do Ponto 03 (Área 18) foi classificada como ML – silte de baixo limite de liquidez, enquanto a amostra do Ponto 05 (Britador) foi identificada como GM – cascalho siltoso com areia, também com propriedades de expansão e contração desprezíveis.

4.5 California Bearing Ratio (CBR)

Os resultados dos ensaios de compactação, realizados com a energia do Proctor Modificado, contendo os valores de peso específico seco máximo ($\rho_{d,máx}$) e teor de umidade ótimo ($w_{ótima}$), bem como os resultados do ensaio de CBR, incluindo os valores de expansão, estão apresentados na Tabela 4.9. Esses resultados evidenciam as diferenças entre os materiais

empregados nas áreas amostradas, refletindo a variação nas propriedades dos solos e seu comportamento em relação à compactação e à capacidade de suporte.

Tabela 4.9: Resultados ensaios de compactação, CBR e expansão.

Amostra	$W_{ótima}$ (%)	$\rho_{d,máx}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
Ponto 01 (Área 10)	5,60	2,553	62	0,00
Ponto 02 (Área 15)	5,70	2,505	118	0,02
Ponto 03 (Área 18)	12,70	1,974	19	2,20
Ponto 04 (Área 08)	4,80	3,070	173	0,02
Ponto 05 (Britador)	4,40	2,922	153	0,00

No Ponto 01 (Área 10), o solo apresentou um teor de umidade ótimo de 5,60% e um peso específico seco máximo de 2,553 g/cm³, com um CBR de 62% e expansão nula, indicando características adequadas para uso em camadas de suporte intermediário.

No Ponto 02 (Área 15), o teor de umidade ótimo foi de 5,70%, com peso específico seco máximo de 2,505 g/cm³ e um CBR elevado de 118%, acompanhado de uma expansão mínima de 0,02%. Esses valores sugerem boa resistência e baixa suscetibilidade à deformação.

No Ponto 03 (Área 18), foram obtidos um teor de umidade ótimo de 12,70%, peso específico seco máximo de 1,974 g/cm³, CBR de apenas 19% e expansão de 2,20%. Esses resultados indicam baixa resistência e alta deformabilidade, evidenciando limitações para aplicações em camadas do pavimento sem tratamento adequado.

O Ponto 04 (Área 08) apresentou o maior peso específico seco máximo, de 3,070 g/cm³, e o maior CBR, de 173%, com teor de umidade ótimo de 4,80% e expansão mínima de 0,02%. Esses resultados refletem resistência e estabilidade, tornando o solo adequado para uso em pavimentos.

Por fim, o Ponto 05 (Britador) apresentou peso específico seco máximo de 2,922 g/cm³ e um CBR de 153%, com um teor de umidade ótimo de 4,40% e expansão nula, indicando um material de alta qualidade e desempenho para aplicações em camadas de base e sub-base.

4.6 Seleção dos materiais

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), para que um material seja utilizado como camada de pavimento, ele deve atender aos seguintes critérios técnicos:

- Camada de base: o material deve apresentar expansão $\leq 0,5\%$, CBR $\geq 80\%$, limite de LL $\leq 25\%$ e IP $\leq 6\%$;
- Camada de sub-base: o material deve apresentar expansão $\leq 1\%$, CBR $\geq 20\%$ e IG = 0.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.8, concluiu-se que os materiais dos Pontos 02, 04 e 05 indicados para aplicação em camadas de base devido aos elevados valores de CBR e às baixas expansões. O material do Ponto 01 pode ser utilizado na camada de sub-base, enquanto o material do Ponto 03 exige estabilização para alcançar os parâmetros mínimos exigidos pelo DNIT.

Em contrapartida, a Tabela 4.10 apresenta uma análise detalhada dos aspectos funcionais dos materiais estudados, correlacionando-os com os potenciais impactos que podem surgir quando empregados como materiais de base, como desprendimento granular, formação de poeira, corrugação e resistência ao desgaste.

Tabela 4.10: Seleção de materiais e impactos na funcionalidade.

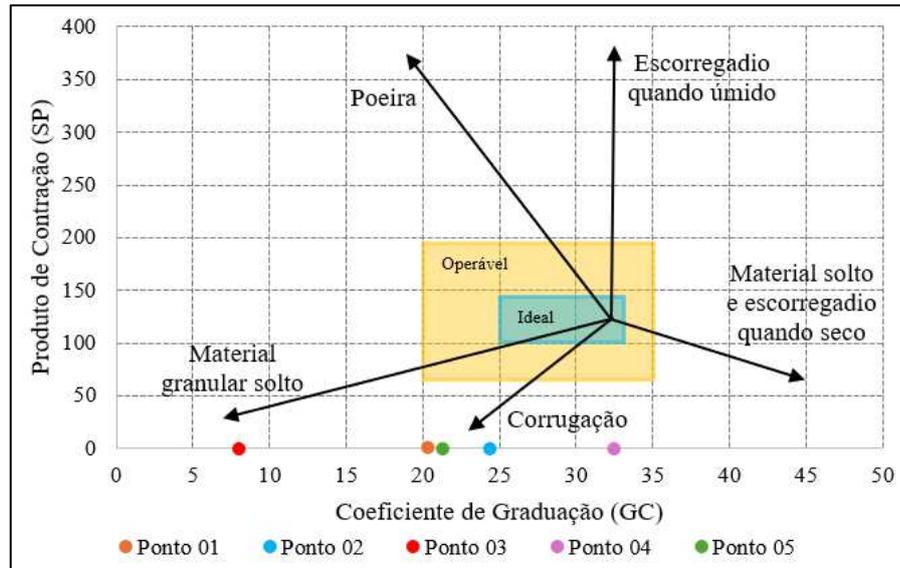
Propriedade	Amostra					Limites	Impactos na funcionalidade
	P01	P02	P03	P04	P05		
Produto de contração (SP)	0	0	0	0	0	85 - 200	Redução no escorregamento, porém com tendência ao desprendimento de material granular e à formação de corrugação.
Coefficiente de graduação (GC)	20,41	24,34	7,98	32,48	21,31	20 - 35	Redução do desprendimento de material granular, porém com menor resistência ao desgaste
Limite de liquidez LL (%)	NP	NP	NP	NP	NP	17 - 24	Diminuição do potencial de escorregamento, mas apresenta tendência à geração de poeira.
Limite de plasticidade LP (%)	NP	NP	NP	NP	NP	12 - 17	
Índice de plasticidade IP (%)	NP	NP	NP	NP	NP	4 - 8	Diminui o potencial de escorregamento, mas apresenta tendência à geração de poeira e desprendimento de material
CBR	62	118	19	173	153	mín. 80	Resistência à erosão, corrugação e melhoria na trafegabilidade.
Tamanho máximo de partícula (mm)	25,1	25,1	25,1	19,1	37,5	máx. 20	Facilidade de manutenção, conforto para os veículos e ausência de danos aos pneus.

Fonte: Adaptado de Thompson e Visser (2000).

Thompson e Visser (1999; 2000; 2006), em seus trabalhos, definiram parâmetros para assegurar o desempenho funcional ideal de materiais utilizados em camadas de base (Tabela 4.10). Esses parâmetros permitem avaliar a adequação do material às condições de uso, considerando aspectos como resistência, durabilidade e comportamento frente a cargas elevadas.

Ainda segundo os mesmos autores, a escolha do material para camadas de desgaste deve considerar não apenas os parâmetros físicos, como o SP e o GC, mas também a interação desses materiais com as condições operacionais específicas, como carga por roda, intensidade de tráfego e clima local. A Figura 4.12 apresenta o gráfico utilizado para a seleção do material da camada de base com desempenho ideal.

Figura 4.12: Resultados materiais e impactos na funcionalidade



As amostras analisadas apresentam características que indicam um desempenho comprometido para pavimentação. Elas tendem a ser escorregadias, especialmente quando molhadas, devido ao baixo valor de SP, o que reduz a aderência da superfície. Além disso, observou-se um maior desprendimento de material granular, resultando em maior desgaste da superfície e formação de corrugações, o que pode comprometer a trafegabilidade. Esses fatores indicam a necessidade de manutenção e conservação constante das vias.

Dentre os materiais analisados, a amostra Ponto 04, destaca-se por apresentar os resultados mais satisfatórios. Embora tenha mostrado desprendimento de material granulado e formação de corrugações, ela se caracteriza por uma boa resistência à erosão e maior trafegabilidade, o que contribui para um desempenho superior em termos de durabilidade. Além disso, oferece facilidade de manutenção, proporcionando uma via de boa trafegabilidade sem causar danos aos pneus, o que a torna uma opção vantajosa para pavimentação, especialmente em ambientes de tráfego intenso.

4.7 Dimensionamento do pavimento

4.7.1 Método do CBR

O método CBR é amplamente utilizado devido à sua facilidade de aplicação e à rapidez na obtenção dos dados necessários. Por essas características, ele continua sendo uma ferramenta essencial para o dimensionamento de pavimentos em vias de tráfego de baixo a médio volume. Além de sua simplicidade, o método também oferece uma boa relação custo-benefício, o que o torna uma escolha popular em projetos de pavimentação.

Os valores de CBR dos materiais analisados ao longo do estudo variaram entre 19% e 173%, refletindo a diversidade das propriedades mecânicas e da capacidade de suporte de cada material. Para o caminhão fora de estrada modelo Caterpillar 785C, foi considerada uma carga por roda de 41,79 kN, o que representa a magnitude da pressão exercida sobre o pavimento durante a operação.

No dimensionamento do pavimento, foi adotado um valor de CBR = 20% para a resistência do subleito, considerando as características do solo e as condições locais. Utilizando o ábaco apresentado na Figura 3.6, que permite determinar a espessura total da camada a ser construída sobre o subleito com base no valor do CBR, obteve-se uma espessura de 0,38 m para as camadas de pavimento.

Para o dimensionamento da camada de sub-base, foi escolhida a amostra Ponto 01 (Área 10), que apresenta um valor de CBR de 62%. A partir do ponto de interseção das linhas de CBR e carga de roda no ábaco (Figura 3.6), obteve-se uma espessura de 0,20 m. Já para a camada de base, foi utilizada a amostra do Ponto 04 (Área 08), com um valor de CBR de 173%. Dado que esse valor extrapola a escala do ábaco, a espessura da base foi determinada por diferença, resultando em uma espessura de 0,18 m (Tabela 4.11). Essa abordagem foi adotada dado que o valor obtido para o CBR é superior a 100%.

Tabela 4.11: Espessura das camadas do pavimento.

Material	Camada	CBR (%)	Espessura (m)
Ponto 04 (Área 08)	Base	173	0,20
Ponto 01 (Área 10)	Sub-base	62	0,18
Hematita Friável	Subleito	10	∞

4.7.2 Método do DNER

A Mina de Fábrica, operada pela Vale e localizada em Ouro Preto (MG), possui uma capacidade nominal de produção de 16 Mtpa (Duarte, 2009) e movimenta anualmente cerca de 47 Mtpa de estéril. Embora não tenham sido divulgados dados oficiais sobre a vida útil da mina, estima-se um horizonte operacional de 30 anos. A produção diária da mina é de 128.767 toneladas, e o transporte do minério é realizado com caminhões fora de estrada do modelo Caterpillar 785C, que possuem uma capacidade média de carga de 130 toneladas por viagem. Dessa forma, o número estimado de viagens diárias para atender à demanda de produção é de 991 viagens (V_0), sendo o volume médio diário de tráfego no ano de abertura, em um sentido de 496 veículos (V_1).

Com base em dados estimados, a estrada foi projetada com um período de vida útil de 15 anos (PP), considerando uma taxa de crescimento anual de tráfego de 0,5% (t), definida como uma progressão linear. O sentido mais solicitado corresponde a 50% do fluxo total, alocado para uma faixa por sentido. Para dimensionamento do pavimento, foram seguidos os seguintes passos:

i. Seleção dos materiais a serem empregados nas camadas do pavimento

Na seleção dos materiais, foram considerados os parâmetros de CBR mínimo, expansão máxima e IG para os materiais de sub-base. Para os materiais de base, foram avaliados os parâmetros de CBR mínimo, expansão máxima, LL, IP e a adequação do material a uma das faixas granulométricas estabelecidas no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), conforme Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Seleção dos materiais camadas de base e sub-base.

Amostra	Ponto 01 (Área 10)	Ponto 02 (Área 15)	Ponto 03 (Área 18)	Ponto 04 (Área 08)	Ponto 05 (Britador)	
Quantidade de material passante por peneira (%)	2"	100	100	100	100	
	1"	99,25	99,12	96,20	100	83,68
	3/8"	88,55	89,12	94,59	96,48	58,79
	4	78,45	79,01	91,02	86,58	48,21
	10	68,86	68,31	87,43	62,48	39,47
	40	57,94	60,56	80,97	48,83	30,22
	200	36,73	25,09	66,40	29,15	18,57
CBR (%)	62	118	19	173	153	
Expansão (%)	0	0,02	2,2	0,02	0	
Camada	sub-base	base/sub-base	inadequado	base/sub-base	base/sub-base	
Faixa Granul.	não enquadra	Faixa F	não enquadra	não enquadra	Faixa B	

- ii. Cálculo do volume médio diário de tráfego (V_m), durante o período de P anos:

$$VM = \frac{V_1 * [2 + (PP - 1) * t/100]}{2} = 513$$

- iii. Cálculo do volume total de tráfego, (num sentido) durante o período (V_t):

$$Vt = 365 * PP * VM = 2,81 * 10^6$$

- iv. Cálculo do fator de eixo (FE):

$$FE = (p_2/100) * 2 + (p_3/100) * 3 + \dots + (p_n/100) * n = 2$$

- v. Cálculo do fator de equivalência de carga (FEC), considerando todos os veículos sendo caminhões fora de estrada do modelo Caterpillar 785C, considerando o carregamento máximo no eixo traseiro de 167 t e 2 eixos:

$$FEC = EQQP/100 = 1,64 * 10^6$$

- vi. Cálculo do fator climático regional (FR):

A precipitação média anual em Ouro Preto, MG, é de aproximadamente 1804 mm. De acordo com Souza (1981), citado por Sousa (2011), sugere-se um FR relacionado à altura média de chuva de 1,8.

- vii. Cálculo no número N , considerando o período de projeto de 15 anos:

$$N = Vt * FE * FEC * FR = 1,66 * 10^{13}$$

- viii. Cálculo de equivalência estrutural, adotado $K = 1,0$ (camadas granulares)
- ix. Cálculo da espessura das camadas (H_m), adotado um valor de $CBR = 20\%$ para a resistência do subleito:

$$H_m = 77,67 * N^{0,0482} * CBR^{-0,598} = 56,16 \text{ cm}$$

Considerando a boa capacidade de suporte do subleito, a ausência de camadas de revestimento em estradas mineiras e o fato de o ábaco (Figura 3.7) abranger apenas valores de CBR entre 0 e 20, foi definida a utilização de uma única camada de base com espessura de 56,16 cm.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Considerações finais

Devido ao intenso trânsito de caminhões nas pistas de rolamento, mesmo com a manutenção frequente das vias e a aplicação constante de aspersão de água por caminhões-pipa ao longo do dia — medidas que geram elevados custos operacionais —, foram identificadas diversas irregularidades na superfície do pavimento. Conforme os resultados do estudo, constatou-se que não há, atualmente, um método de dimensionamento de pavimentos que seja plenamente adequado às especificidades das estradas mineiras, especialmente no que tange ao porte dos equipamentos utilizados, o que reforça a necessidade de desenvolver metodologias mais apropriadas para este tipo de aplicação.

Este estudo teve como objetivo realizar a caracterização, por meio de ensaios laboratoriais, das propriedades físicas e mecânicas dos materiais coletados em trechos de importância estratégica e que apresentavam maiores inconformidades na Mina do Segredo. Essa análise permitiu avaliar aspectos como granulometria, plasticidade, compactação, resistência mecânica e outros parâmetros essenciais para determinar a adequação desses materiais à aplicação em camadas de base e sub-base rodoviária, contribuindo para o dimensionamento estrutural.

Os resultados dos ensaios de granulometria indicaram que todas as amostras analisadas apresentaram má graduação e, em sua maioria, desuniformidade. Essas características podem comprometer o processo de compactação, resultando em uma camada com menor densidade. Como consequência, ocorre uma redução na capacidade de suporte do pavimento, tornando-o mais vulnerável a deformações e ao surgimento de defeitos ao longo de sua vida útil.

A composição mineralógica das amostras revelou a presença predominante de argilominerais não expansivos ou em pequenas quantidades, com exceção da Amostra Ponto 03, que apresenta 55,1% de sua estrutura composta por caulinita, um mineral expansivo. Esse comportamento expansivo é compatível com os resultados obtidos no ensaio de expansão, que indicaram que a amostra não atende às exigências técnicas para ser utilizada nas camadas do pavimento. A presença significativa de caulinita compromete a estabilidade dimensional do material, tornando-o inadequado para pavimentos sujeitos a variações de umidade e cargas elevadas.

Quanto a análise detalhada dos aspectos funcionais dos materiais estudados e os critérios técnicos estabelecidos no Manual de Pavimentação do DNIT, nenhum dos materiais analisados

é considerado adequado para a aplicação proposta. Nenhum deles atende aos requisitos necessários, especialmente no que diz respeito a aspectos como resistência, durabilidade e comportamento frente as cargas elevadas, tornando-os inadequados para o uso em pavimentos que exijam alto desempenho.

Com base nos métodos utilizados para o dimensionamento da camada de revestimento primário, pode-se concluir que os mesmos não são adequados para o dimensionamento de estradas mineiras. No caso do método CBR (California Bearing Ratio), observou-se que não foi necessário realizar adaptações significativas para sua aplicação no cenário estudado, indicando que este método é viável dentro das condições especificadas.

Por outro lado, para o método do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), algumas dificuldades foram identificadas. Foi necessária a extrapolação das curvas do fator de equivalência de operação devido às altas cargas aplicadas, uma vez que o manual não foi desenvolvido para contemplar condições tão exigentes, como as encontradas em estradas mineiras. Além disso, o manual não trata adequadamente das camadas de revestimento primário, o que gerou a necessidade de uma camada adicional de revestimento. O ábaco utilizado no método também não leva em consideração as especificidades dos materiais, especialmente no que diz respeito à resistência, o que pode comprometer sua aplicabilidade.

Portanto, é evidente que, para garantir a eficácia do dimensionamento em estradas mineiras, seriam necessárias adaptações ou o desenvolvimento de novos métodos que considerassem as particularidades desses pavimentos, como o tipo de carga e as características dos materiais utilizados, bem como as condições climáticas e geográficas da região.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para os trabalhos futuros, algumas sugestões que podem contribuir para aprimorar o dimensionamento de camadas de revestimento primário em estradas mineiras incluem:

- Desenvolvimento de métodos específicos para estradas mineiras: Considerando as características distintas das estradas mineiras, como o tipo de carga, materiais locais e condições geográficas, seria importante o desenvolvimento ou adaptação dos métodos de dimensionamento. Isso inclui o dimensionamento de pavimentos com base em dados específicos de cada projeto para obtenção de uma avaliação mais precisa do desempenho dos materiais no pavimento.

- Revisão e atualização do método DNER: O método do DNER necessita de ajustes em relação à extrapolação das curvas do fator de equivalência de operação, além da inclusão de diretrizes específicas para o dimensionamento das camadas de revestimento primário em condições de alto tráfego e cargas intensas. A revisão do manual e do ábaco utilizado pode garantir maior precisão e aplicabilidade em cenários com características onde o número de solicitações extrapola o número de operações do eixo padrão;
- Estudo dos materiais locais: Realizar uma análise aprofundada dos materiais disponíveis na região da Mina Segredo, levando em consideração suas propriedades mecânicas e seu comportamento sob diferentes condições climáticas e de carga. A seleção de um material que atenda às exigências mecânicas e funcionais é essencial para aprimorar o desempenho das vias, com o objetivo de mitigar os efeitos das vibrações e otimizar as condições operacionais das estradas e dos equipamentos utilizados;
- Simulações computacionais: A utilização de softwares de simulação para modelar o comportamento das camadas de pavimento sob diversas condições de carga e clima pode ser uma ferramenta importante para a melhoria do dimensionamento;
- Monitoramento e trecho experimental: Para validar os métodos propostos, seria fundamental realizar estudos de campo com monitoramento constante das condições das estradas, avaliando a performance das camadas de revestimento em diferentes períodos e condições operacionais. A coleta de dados reais ajudaria a refinar os modelos e métodos teóricos com base em resultados práticos.

Essas sugestões podem fornecer uma base para o aprimoramento das práticas de dimensionamento de estradas mineiras, resultando em infraestruturas mais duráveis, eficientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT. (2016a). NBR 6458 - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 14 p.
- ABNT. (2016b). NBR 6459 - Solo: Determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 5 p.
- ABNT. (2016c). NBR 7180 - Solo: Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 3 p.
- ABNT. (2016d). NBR 7181 - Solo: Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 12 p.
- ABNT. (2016e). NBR 7182 - Solo: Ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 9 p.
- ABNT. (2024). NBR 6457 - Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 11 p.
- Anuário Mineral Brasileiro. (2023). Principais substâncias metálicas. Agência Nacional de Mineração, Brasília: ANM. 23 p.
- AS. (2008). AS 1289.3.4.1 Methods of testing soils for engineering purposes - determination of the linear shrinkage of a soil: standard method. Australian Standard. 3 p.
- ASTM. (2017). D2487 - Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). In Annual Book of ASTM Standards, 10 p.
- Cabral, W. S., Barroso, S. H. de A., & Silva, S. de A. T. e. (2021). Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região nordeste na análise mecanística-empírica de pavimentos. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 26, 15. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1396>
- Cardoso, J. C. R.; Caetano, M. R.; Paula G. F.; Fernandes, P. C.; Silva, R. C. (2023). Efeito da variação da umidade de compactação nos módulos de resiliência de solos de subleito do Distrito Federal. *Anais da 48ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, Digital*, p. 181-192.
- Cordeiro, U. E. B. (2021). *Manutenção de vias em minas de céu aberto: e suas relações causais*. Editora Dialética.
- DNIT. (2006). *Manual de pavimentação*. Publicação IPR - 179. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias.
- DNIT. (2016). ME-172/2016. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 17 p.
- DNIT. (2023). ER-445/2023. Terraplenagem – Revestimento primário – Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 11 p.
- Duarte, R. S. (2009). *Reconciliação: estudo da metodologia utilizada na Mina Fábrica da Vale S.A. em Ouro Preto, Minas Gerais (Curso de Especialização em Sistemas Mineradores-Metalúrgicos)*. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Gonçalves, A. K. L.; Espíndola, A. C. (2020). Diagnóstico da condição dos pavimentos das rodovias federais do Estado do Piauí. *Anais do XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Digital*, v. 1, p. 899–910.
- Hustrulid, W. A., Kuchta, M., & Martin, R. K. (2013). *Open Pit Mine Planning and design*. Crc Press.

- Kern, C. (2022). Efeito da variação de umidade e sucção no comportamento mecânico e em simulações de desempenho de dois solos utilizados em pavimentos rodoviários (Tese de Doutorado em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Lemos, J. R., & Santos, A. A. dos. (2013). Desenvolvimento de ferramenta computacional para dimensionamento de pavimentos pelos métodos do DNE e da resiliência. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/1722>
- Medina, J. de, & Motta, L. M. G. da. (2015). Mecânica dos pavimentos. Editora Interciência.
- Ministério de Minas e Energia. (2001). NRM-02 - Lavra a Céu Aberto. Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001. Aprova as Normas Reguladoras de Mineração - NRM, de que trata o Art. 97 do Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967.
- Ministério de Minas e Energia. (2001). NRM-13 - Circulação e Transporte de Pessoas e Materiais. Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001. Aprova as Normas Reguladoras de Mineração - NRM, de que trata o Art. 97 do Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967.
- Oda, S. (1995). Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.1995.tde-14012005-161818>
- Oliveira, J. I. G., & Aragão, E. G. S. (2019). Projeto geométrico de rodovias pelas normas do DNIT. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE, 5(2), Artigo 2.
- Pedrosa Soares, A. C., Voll, E., & Cunha, E. C. (2018). Recursos minerais de Minas Gerais online: Síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração em Minas Gerais. Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE).
- Pellissari, F. P. (2019). Projeto de estradas para mineração – caracterização e análise de aplicações práticas. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/201324>
- Reis, M. dos S. (2014). Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra a céu aberto de minério de ferro dentro do Quadrilátero Ferrífero. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/4123>
- Rodvalho, E. da C., Lima, H. M., & de Tomi, G. (2016). New approach for reduction of diesel consumption by comparing different mining haulage configurations. *Journal of Environmental Management*, 172, 177–185. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.048>
- Roeser, H. M. P., & Roeser, P. A. (2010). O Quadrilátero Ferrífero - MG, Brasil: Aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. *Revista Genomos*, v. 18, n. 1, p. 33-37. Disponível em: <https://doi.org/10.18285/genomos.v18i1.67>
- Santos, V. N. dos. (2022). Avaliação de um projeto integrado de estrada de mina. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/15959>
- Silva, P. G. C. (2019). Análise da influência da rugosidade de estradas de mina nos parâmetros operacionais de transporte. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/11931>
- Silva, T. O., Carvalho, C. A. B., Lima, D. C., & Calijuri, M. L. (2011). Condições de serventia de estradas não-pavimentadas: Estudo de caso aplicado às vias do município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil. *Acta Scientiarum: Technology*, 33(2), 171–177.
- Sousa, L. M. L. S. (2011). Estudos de dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/3283>

- Sousa, L. M. L. S.; Oliveira Filho, W. L.; Lima, H. M. (2012). Dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto. *Revista Escola de Minas*, v. 65, n. 2, p. 279–284. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672012000200018>
- Taskiran, T. (2010). Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine grained soils by AI methods. *Advances in Engineering Software*. *Advances in Engineering Software*, v. 41, n. 6, p. 886–892. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.01.003>
- Thompson, R. J., & Visser, A. T. (1999). Designing and managing unpaved opencast mine haul roads for optimum performance. In: *SME Annual Meeting*, 9 p., Denver, Colorado.
- Thompson, R. J., & Visser, A. T. (2000). The functional design of surface mine haul roads. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Thompson, R. J., & Visser, A. T. (2006). Selection and maintenance of mine haul road wearing course materials. *Mining Technology*, 115, 140–153. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/174328606X155138>
- Thompson, R. J., Peroni, R., & Visser, A. T. (2019). *Mining Haul Roads: Theory and Practice* (1ª ed.). CRC Press. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780429491474>
- VALE. (2011). *Manual de Estradas de Mina*. Ouro Preto, Minas Gerais. 117 p.-