



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



Vinícius Araújo Pena

Análise comparativa da viabilidade técnica estrutural do
pavimento asfáltico no trecho Mariana–Ouro Preto a partir da
comparação entre métodos de dimensionamento

Ouro Preto

2025

Vinícius Araújo Pena

Análise comparativa da viabilidade técnica estrutural do pavimento asfáltico no trecho Mariana–Ouro Preto a partir da comparação entre métodos de dimensionamento

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Graduado em Engenharia Civil.

Orientadora: Dra. Daniela Antunes Lessa

Ouro Preto

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P397a Pena, Vinícius Araújo.

Análise comparativa da viabilidade técnica estrutural do pavimento asfáltico no trecho Mariana-Ouro Preto a partir da comparação entre métodos de dimensionamento. [manuscrito] / Vinícius Araújo Pena. - 2026.

79 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Daniela Antunes Lessa.

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

1. Pavimentos de asfalto. 2. Projeto estrutural - Pavimentos de asfalto. 3. Estudos de viabilidade. 4. Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos asfálticos (MeDiNa). 5. Rodovias - Pavimentos. I. Lessa, Daniela Antunes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vinícius Araújo Pena

Análise da viabilidade técnica estrutural do pavimento asfáltico no trecho Mariana - Ouro Preto a partir da comparação entre métodos de dimensionamento

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 04 de março de 2026

Membros da banca

Prof. ^ª Dr.^ª - Daniela Antunes Lessa - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. - Felipe de Campos Loch - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. - Matheus Henrique Dela Costa Ferreira - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. ^ª Dr.^ª Daniela Antunes Lessa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em XX/XX/XXXX



Documento assinado eletronicamente por **Daniela Antunes Lessa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/03/2026, às 17:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1069438** e o código CRC **1ACBF358**.

Dedico este trabalho aos meus pais, que me ensinaram o valor da dedicação e do esforço, e a todos que me apoiaram ao longo dessa jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família e à minha esposa, pelo apoio incondicional e por acreditar no meu potencial em todos os momentos.

Aos meus amigos e colegas de curso, que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho, com troca de ideias e motivação contínua.

Agradeço também aos professores do curso de Engenharia Civil da UFOP, por todo conhecimento transmitido durante a graduação.

Em especial, agradeço à minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Daniela Antunes Lessa, por sua orientação técnica, paciência e incentivo ao longo do desenvolvimento deste TCC.

RESUMO

O objetivo central desta pesquisa foi avaliar a viabilidade técnica da aplicação do pavimento asfáltico no trecho rodoviário que interliga os municípios de Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais, à luz das condições geográficas, operacionais e estruturais da região. O trecho apresenta relevo acidentado, traçado sinuoso e declividades acentuadas, impondo desafios ao desempenho e à durabilidade dos pavimentos, especialmente diante do tráfego misto com predominância de veículos de transporte mineral e turístico. Para a análise técnica, o dimensionamento do pavimento foi realizado por meio de dois métodos de naturezas distintas, o empírico do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e o mecanístico-empírico MeDiNa, permitindo a comparação dos resultados quanto à espessura das camadas, ao comportamento estrutural e às exigências de suporte. Os cálculos demonstraram que, para atender às solicitações do tráfego e às condições do relevo, ambos os métodos indicaram a necessidade de reforço estrutural, com aumento das espessuras e da rigidez equivalente do sistema de camadas. Conclui-se que o pavimento asfáltico é tecnicamente viável para o trecho analisado, desde que acompanhado de reforço adequado e manutenção periódica. Observa-se, entretanto, que a necessidade de reforço estrutural pode aproximar o nível de investimento do requerido por soluções rígidas, o que reforça a importância de uma avaliação econômica complementar, não contemplada neste estudo. A pesquisa atendeu aos objetivos propostos, ainda que limitada à análise técnica, recomendando-se como continuidade a realização de estudos multicritério que integrem aspectos econômicos, ambientais e sociais na escolha da solução mais adequada ao contexto regional.

Palavras-chave: pavimentação asfáltica, dimensionamento de pavimentos, viabilidade técnica, MeDiNa, pavimentos rodoviários.

ABSTRACT

The main objective of this research was to assess the technical feasibility of applying asphalt pavement to the road section connecting the municipalities of Mariana and Ouro Preto, in Minas Gerais, in light of the geographical, operational, and structural conditions of the region. The stretch has rugged terrain, a winding layout, and steep slopes, posing challenges to the performance and durability of pavements, especially in the face of mixed traffic with a predominance of mineral transport and tourist vehicles. For the technical analysis, the pavement was designed using two different methods: the empirical method of the National Department of Highways (DNER) and the mechanistic-empirical MeDiNa method, allowing for a comparison of the results in terms of layer thickness, structural behavior, and support requirements. The calculations showed that, in order to meet traffic demands and terrain conditions, both methods indicated the need for structural reinforcement, with an increase in the thickness and equivalent stiffness of the layer system. It was concluded that asphalt pavement is technically feasible for the section analyzed, provided that it is accompanied by adequate reinforcement and periodic maintenance. However, it should be noted that the need for structural reinforcement may bring the level of investment closer to that required by rigid solutions, which reinforces the importance of a complementary economic assessment, not covered in this study. The research met the proposed objectives, although limited to technical analysis, and it is recommended that multi-criteria studies be carried out to integrate economic, environmental, and social aspects in choosing the most appropriate solution for the regional context.

Keywords: asphalt pavement, pavement design, technical feasibility, MeDiNa, road pavements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trecho Ouro Preto-Mariana (Minas Gerais).....	37
Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.....	39
Figura 3 – Camadas de método DNER	42
Figura 4 – Ábaco para estimar as espessuras.	42
Figura 5 – Quadrilátero Ferrífero.	47
Figura 6 – Mapa de elevação do anticlinal de Mariana.....	48
Figura 7 – Supergrupo Minas.....	49
Figura 8 – Processo erosivo no trecho Mariana-Ouro Preto.	50
Figura 9 – MeDiNa – Cálculo do Fator de Veículo.	37
Figura 10 – MeDiNa – Cálculo do Fator de Veículo.	39
Figura 11 – MeDiNa – Dados do tráfego.	429
Figura 12 – Definição da estrutura preliminar do pavimento.	42
Figura 13 – Análise estrutural do pavimento.	47
Figura 14 – Alerta do sistema.....	47
Figura 15 – Dimensionamento do pavimento.	49
Figura 16 – Estrutura do pavimento.....	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - <i>California Bearing Ratio</i>	40
Quadro 2 - Espessura mínima de revestimento betuminoso	43
Quadro 3 - Coeficientes de equivalência estrutural.....	44
Quadro 4 - Classificação veicular adotada pela Pesquisa Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT)	51
Quadro 5 - Tráfego veicular do trecho Mariana – Ouro Preto	52
Quadro 6 - Configuração da BR-356 no trecho Mariana – Ouro Preto.....	53
Quadro 7 - Comparativo entre os métodos MeDiNa e DNER	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.1.1 Objetivos Específicos.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA NO BRASIL	15
2.2 TIPOS DE PAVIMENTO	17
2.3 PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA.....	19
2.3.1 Implementação	22
2.3.2 Durabilidade e Desempenho.....	24
2.3.3 Impactos Ambientais	27
2.4 PAVIMENTAÇÃO DE CONCRETO	30
2.5 SÍNTESE CRÍTICA DA LITERATURA.....	33
3. METODOLOGIA.....	36
3.1 TRECHO ANALISADO	37
3.2 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	39
3.2.1 Etapas no MeDiNa: dimensionamento mecânico-empírico.....	40
3.2.2 Etapas no método empírico DNER.....	40

3.3 LIMITAÇÕES DO MÉTODO.....	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 CONDIÇÕES GEOGRÁFICAS E OPERACIONAIS DO TRECHO RODOVIÁRIO MARIANA–OURO PRETO	47
4.2 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO PARA DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO ASFÁLTICO DO TRECHO ESTUDADO	53
4.2.1 <i>MeDiNa – National Pavement Design Method</i>	54
4.2.2 Método empírico do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).....	61
4.3 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO NO TRECHO	65
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS MEDINA E DNER	66
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

O pavimento constitui elemento essencial para o desempenho funcional e estrutural das rodovias, exercendo influência direta sobre a durabilidade da infraestrutura, a segurança operacional e a qualidade do rolamento (DNIT, 2006; Bernucci *et al.*, 2010). Estruturas mal dimensionadas ou incompatíveis com o volume e o tipo de tráfego tendem a apresentar degradação precoce, resultando em aumento dos custos de manutenção, redução da capacidade de suporte e comprometimento do conforto e da segurança dos usuários (Balbo, 2007). Em corredores logísticos de perfil industrial e minerário, onde há predominância de veículos pesados e tráfego intenso, essas fragilidades estruturais tornam-se mais evidentes, em função das cargas repetitivas concentradas e das condições adversas do terreno e do clima (Gontijo, 2021).

No contexto brasileiro, os pavimentos flexíveis, compostos por misturas asfálticas aplicadas sobre camadas granulares, representam a solução mais empregada devido ao menor custo inicial, à execução ágil e à rápida liberação ao tráfego (Bernucci *et al.*, 2010). Entretanto, sua durabilidade estrutural é fortemente influenciada por fatores ambientais e operacionais, como a pluviosidade intensa, as variações térmicas e o tráfego pesado contínuo, que tendem a reduzir sua vida útil e aumentar a frequência de intervenções de manutenção (Hallack, 2008). Nesse cenário, a avaliação da viabilidade técnica do pavimento asfáltico, considerando métodos de dimensionamento e as especificidades locais, torna-se fundamental para garantir desempenho estrutural e sustentabilidade operacional da rodovia.

O trecho rodoviário que interliga os municípios de Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais, insere-se nesse contexto de complexidade geotécnica e operacional. Trata-se de uma via estratégica para o escoamento de minérios e insumos industriais, caracterizada por relevo montanhoso, declividades acentuadas, curvas sinuosas e regime pluviométrico intenso e irregular. A combinação desses fatores resulta em severas solicitações mecânicas sobre o pavimento, exigindo estruturas com elevado desempenho frente à fadiga, às deformações plásticas e à deterioração acelerada das camadas superiores.

Apesar da ampla utilização do pavimento asfáltico em rodovias brasileiras, sua aplicação em trechos com relevo acidentado, tráfego pesado e regime pluviométrico intenso ainda suscita questionamentos quanto à sua adequação estrutural e vida útil. No trecho rodoviário entre Mariana e Ouro Preto, essas condições impõem elevadas solicitações mecânicas ao pavimento, o que levanta

dúvidas técnicas sobre a capacidade dos métodos tradicionais e mecanístico-empíricos de dimensionamento em garantir desempenho satisfatório e durabilidade da estrutura projetada. Assim, o problema técnico desta pesquisa reside na incerteza quanto à viabilidade estrutural do pavimento asfáltico quando dimensionado por diferentes metodologias, frente às condições específicas de tráfego, geometria e ambiente do trecho estudado.

Diante dessas características, coloca-se a seguinte questão de pesquisa: a aplicação do pavimento asfáltico no trecho rodoviário entre Mariana e Ouro Preto é tecnicamente viável frente às solicitações de tráfego e às condicionantes geométricas e operacionais do trecho, segundo a análise realizada por diferentes métodos de dimensionamento estrutural?

Para responder a essa questão, este trabalho analisa a viabilidade técnica da aplicação do pavimento asfáltico no trecho Mariana–Ouro Preto por meio da aplicação e comparação de dois métodos de dimensionamento estrutural, o modelo empírico do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e o método mecanístico-empírico MeDiNa. Essa comparação permite analisar o comportamento estrutural da solução projetada e os principais pontos de convergência e limitação.

É importante ressaltar que o estudo não inclui ensaios experimentais nem levantamentos de campo, concentrando-se exclusivamente na análise teórico-comparativa dos métodos de dimensionamento aplicados a dados secundários. Essa delimitação metodológica é justificada pelo caráter analítico e exploratório da pesquisa, cujo objetivo é avaliar a adequação e a eficiência dos modelos de cálculo quando aplicados a um trecho real, e não reproduzir o processo construtivo em escala experimental. Essa abordagem é amplamente aceita em estudos de engenharia rodoviária (DNIT, 2006; Hallack, 2008), pois permite compreender o comportamento estrutural de pavimentos a partir de parâmetros técnicos normatizados e bases de dados oficiais.

De todo modo, o trabalho insere-se no esforço de atualização metodológica da engenharia rodoviária nacional, ao avaliar comparativamente a aplicação de dois métodos de dimensionamento sobre um caso real de alta complexidade geotécnica, contribuindo para o aperfeiçoamento das decisões técnicas voltadas à durabilidade, segurança e sustentabilidade dos pavimentos asfálticos em corredores logísticos estratégicos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a o dimensionamento de pavimento asfáltico através de diferentes métodos no trecho rodoviário Mariana–Ouro Preto, considerando as condições operacionais e geométricas da via, com base na comparação entre métodos de dimensionamento estrutural.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar as condições geográficas, geométricas e operacionais do trecho rodoviário entre os municípios de Mariana e Ouro Preto;
- Aplicar os métodos de dimensionamento MeDiNa e DNER para a definição da estrutura do pavimento asfáltico no trecho em estudo;
- Analisar a adequação da aplicação do pavimento asfáltico no trecho em estudo a partir dos resultados estruturais obtidos pelos métodos de dimensionamento adotados.

1.2 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema fundamenta-se na constatação de que parte da malha rodoviária brasileira apresenta desempenho estrutural inferior ao esperado, frequentemente associado ao subdimensionamento dos pavimentos e à inadequação entre a solução adotada e as condições reais de tráfego e clima (Bennucci *et al.*, 2010; DNIT, 2006). Esse cenário compromete a durabilidade das rodovias, eleva os custos de manutenção e impacta diretamente a segurança dos usuários e a eficiência logística do transporte de cargas. Esses problemas tornam-se particularmente relevantes em corredores de tráfego pesado e misto, como o trecho que interliga Mariana a Ouro Preto (MG), caracterizado pela presença de veículos de transporte mineral, ônibus intermunicipais e automóveis de uso turístico, além de relevo acidentado e regime pluviométrico significativo.

Nesse contexto, compreender o desempenho de diferentes metodologias de dimensionamento aplicadas a condições específicas de tráfego e ambiente constitui uma contribuição relevante à engenharia rodoviária, especialmente em trechos com elevada complexidade geométrica e operacional. A literatura científica apresenta estudos sobre dimensionamento de pavimentos, incluindo pesquisas nacionais e internacionais que abordam

métodos empíricos tradicionais e abordagens mecanístico-empíricas mais recentes (Hallack, 2008; Gontijo, 2021; Franco; Motta, 2018; DNIT, 2023), bem como investigações sobre pavimentos em contextos regionais (Santos, 2021; Ventura, 2023). Contudo, observa-se que ainda são relativamente limitados os estudos que realizam análises comparativas estruturadas entre o método empírico do DNER e o método mecanístico-empírico MeDiNa aplicados simultaneamente a um mesmo trecho real de rodovia, considerando as mesmas condições de tráfego e características geométricas e topográficas.

Dessa forma, a relevância científica da presente pesquisa reside na aplicação e comparação dos métodos de dimensionamento empírico do DNER e mecanístico-empírico MeDiNa em um mesmo trecho rodoviário, analisando as diferenças estruturais e de desempenho projetado associadas a cada metodologia. A análise comparativa entre esses métodos pode contribuir para o aprimoramento dos critérios técnicos utilizados no dimensionamento de pavimentos flexíveis, fornecendo subsídios para a tomada de decisão em projetos de infraestrutura rodoviária no contexto brasileiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta os fundamentos teóricos e técnicos que sustentam a análise proposta, contemplando a evolução da infraestrutura rodoviária no Brasil, as tipologias de pavimentos e os parâmetros associados ao seu dimensionamento. Inicialmente, apresenta-se um panorama histórico da infraestrutura rodoviária brasileira. Em seguida, discute-se a diferenciação entre pavimentos asfálticos e de concreto, com ênfase no primeiro. Por fim, a seção se encerra com uma síntese crítica da literatura, na qual são identificadas as principais limitações dos estudos existentes.

2.1 INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA NO BRASIL

O desenvolvimento da infraestrutura rodoviária no Brasil consolidou-se ao longo do século XX como elemento essencial para a integração territorial e o escoamento da produção (Cipriano *et al.*, 2021). A criação do DNER, em 1926, marcou o início de uma política nacional voltada à pavimentação e ao dimensionamento das vias, estabelecendo diretrizes técnicas para a construção e manutenção das rodovias de interesse federal. Durante o governo de Washington Luís, o lema “governar é abrir estradas” sintetizou o impulso dado à ampliação e pavimentação de trechos nas regiões mais desenvolvidas do país, dando origem à primeira rede rodoviária planejada (DNIT, 2006).

Nos anos 1950, o Plano de Metas do governo de Juscelino Kubitschek representou um marco na expansão e modernização das estradas brasileiras. A construção da rodovia Belém-Brasília e a pavimentação de ligações inter-regionais, como a Rio-Bahia e a Brasília-Acre, simbolizaram a transição de um sistema predominantemente ferroviário para um modelo rodoviário, mais adequado à crescente frota de veículos automotores (Salomão e Froés, 2020). Essa fase consolidou o uso da pavimentação asfáltica como principal técnica de revestimento e reforçou a necessidade de critérios de dimensionamento compatíveis com o aumento do tráfego e da carga transportada (DNIT, 2006).

Durante o regime militar, entre as décadas de 1960 e 1980, os Planos Nacionais de Desenvolvimento intensificaram a construção de grandes rodovias federais, como a Transamazônica (BR-230) e a Cuiabá-Santarém (BR-163). Embora esses projetos tenham ampliado significativamente a malha pavimentada, a ausência de estudos geotécnicos e ambientais em parte das obras comprometeu sua durabilidade. Ao final da década de 1970, a malha federal

pavimentada já superava 40 mil quilômetros, resultado de investimentos centralizados e de um modelo de expansão territorial voltado à integração logística (Salomão e Froés, 2020).

A partir dos anos 1980, o país enfrentou um período de retração nos investimentos públicos, o que provocou a deterioração acelerada das vias e o enfraquecimento das políticas de manutenção. Essa crise levou à busca por novas formas de financiamento e gestão, resultando, na década de 1990, na adoção do modelo de concessões rodoviárias (Salomão e Froés, 2020). O Programa de Concessões Rodoviárias Federais, criado com base na Lei nº 8.987/1995, transferiu à iniciativa privada a responsabilidade pela operação e conservação de trechos estratégicos, como a Via Dutra e a Fernão Dias, introduzindo parâmetros de desempenho e padrões técnicos mais rigorosos para o dimensionamento e a pavimentação das rodovias concedidas (Salomão e Froés, 2020).

Com o lançamento do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) em 2007, o Estado buscou retomar o protagonismo na ampliação da infraestrutura rodoviária. As obras de duplicação e restauração de rodovias, aliadas à pavimentação de trechos em regiões com baixa densidade viária, visaram modernizar a rede existente (Hallack, 2008). Em 2016, o Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) ampliou a participação privada no setor, com foco na eficiência operacional, segurança viária e inovação tecnológica. Essa política contribuiu para consolidar o uso de técnicas modernas de pavimentação e para reforçar os critérios de dimensionamento estrutural das vias (Hallack, 2008).

Atualmente, a malha rodoviária brasileira reflete o acúmulo histórico dessas etapas de expansão e modernização. As políticas públicas buscam equilibrar a ampliação da rede pavimentada com ações de manutenção e reabilitação, reconhecendo que a sustentabilidade do sistema depende de estratégias de dimensionamento adequadas às condições geotécnicas e climáticas de cada região. Apesar dos avanços, persistem desafios quanto à durabilidade dos pavimentos, à integração entre modais e à uniformidade da qualidade construtiva, aspectos diretamente ligados ao desempenho técnico e à eficiência logística do país (Hallack, 2008).

Apesar dos avanços observados nas últimas décadas, a infraestrutura rodoviária brasileira ainda apresenta deficiências que comprometem o desempenho e a durabilidade dos pavimentos. Grande parte das rodovias avaliadas, especialmente nas vias sob responsabilidade estadual ou municipal, apresenta condições classificadas como regulares, ruins ou péssimas. Essa degradação decorre, em grande medida, do subdimensionamento estrutural, da ausência de manutenção programada e do tráfego de cargas superiores aos limites considerados em projeto, resultando em

manifestações patológicas como trincas, afundamentos e desagregações (Omija *et al.*, 2021; Salomão e Froés, 2020).

Outro fator determinante é a defasagem estrutural das rodovias brasileiras. Muitas foram projetadas e construídas entre as décadas de 1950 e 1970, quando o volume de tráfego e a carga por eixo eram significativamente menores (Hallack, 2008). O crescimento da frota de veículos pesados, aliado ao aumento das exigências logísticas, não foi acompanhado por readequações estruturais compatíveis. O dimensionamento das camadas do pavimento e a espessura das faixas de rolamento tornaram-se insuficientes para suportar o nível atual de solicitações, o que resulta em fadiga precoce e falhas estruturais recorrentes (DNIT, 2006).

A drenagem insuficiente constitui um dos fatores relevantes para a durabilidade e o desempenho estrutural das rodovias, uma vez que a infiltração de água nas camadas inferiores do pavimento reduz sua capacidade de suporte e acelera processos de deterioração. Em regiões de alta pluviosidade ou com solos de baixa resistência, esse efeito torna-se mais significativo, contribuindo para falhas estruturais recorrentes (Salomão e Froés, 2020).

Desta forma, verifica-se que as deficiências relacionadas à conservação do pavimento, à defasagem estrutural, e às solicitações crescentes do tráfego evidenciam a necessidade de análises técnicas voltadas à adequação estrutural e ao dimensionamento dos pavimentos rodoviários (Santana *et al.*, 2024). Esses aspectos reforçam a importância da escolha de soluções compatíveis com as condições reais de operação, tema que fundamenta as discussões desenvolvidas nas seções seguintes.

2.2 TIPOS DE PAVIMENTO

O pavimento constitui um dos componentes mais determinantes da infraestrutura rodoviária, influenciando diretamente a durabilidade, o desempenho e a segurança das vias. Sua concepção estrutural envolve o leito estradal, as camadas de suporte geotécnico, a base, a sub-base e o revestimento superficial, responsável pelo contato direto com o tráfego (DNIT, 2006). Os pavimentos têm a função de distribuir adequadamente as cargas dinâmicas provenientes do tráfego, protegendo as camadas inferiores contra deformações e garantindo conforto e segurança ao usuário. Sua definição depende de variáveis técnicas, econômicas e ambientais, como o tipo de solo, o volume de tráfego e o regime climático (Rocha *et al.*, 2022).

A engenharia rodoviária classifica os pavimentos em três categorias principais: flexíveis, rígidos e semirrígidos. Os pavimentos flexíveis utilizam revestimentos constituídos por misturas betuminosas, geralmente compostas por asfalto e agregados minerais, apoiadas sobre bases granulares ou tratadas com ligantes estabilizantes. Sua principal característica é a capacidade de adaptação às deformações das camadas inferiores, com redistribuição gradual das tensões. Por essa razão, as camadas superiores absorvem a maior parte dos esforços, exigindo restaurações periódicas devido ao processo cumulativo de fadiga (Carvalho, 2007).

Os pavimentos rígidos, por sua vez, são formados por placas de concreto de cimento Portland, que apresentam elevada rigidez e maior capacidade de dispersão das tensões aplicadas. A resistência estrutural concentra-se na própria camada superficial, sendo as camadas inferiores responsáveis pelo suporte secundário e pela regularização geométrica. O desempenho desses pavimentos depende fortemente da execução precisa das juntas de dilatação e do controle tecnológico do concreto. Apesar do custo inicial mais elevado, os pavimentos rígidos tendem a apresentar maior vida útil e menores custos de manutenção estrutural quando corretamente dimensionados (Salomão e Froés, 2020).

Os pavimentos semirrígidos representam uma solução intermediária entre os dois sistemas anteriores. Nesses casos, as bases são tratadas com ligantes hidráulicos, como cimento, combinadas a revestimentos asfálticos (Rocha *et al.*, 2022). O objetivo é associar a rigidez das camadas inferiores à flexibilidade da capa de rolamento, aumentando a capacidade de suporte e reduzindo a propagação de fissuras. Essa tipologia é recomendada para situações que exigem alta resistência à deformação, como corredores logísticos, áreas portuárias e acessos industriais (Salomão e Froés, 2020).

Além dessa classificação estrutural, os pavimentos podem ser subdivididos em revestidos e não revestidos. Os revestidos são impermeáveis e compostos por materiais como concreto betuminoso ou concreto de cimento Portland, predominando em rodovias pavimentadas e áreas urbanas. Já os pavimentos não revestidos utilizam materiais granulares, naturais ou estabilizados, sem capa impermeável, sendo comuns em vias vicinais e regiões de baixa densidade populacional. Estes últimos apresentam menor custo de implantação, mas são altamente suscetíveis à erosão, à ação das chuvas e à degradação acelerada (Salomão e Froés, 2020).

O desempenho funcional dos pavimentos é avaliado por indicadores técnicos, como o Índice de Regularidade Internacional (IRI), o módulo de resiliência, as deflexões acumuladas, a

profundidade da trilha de roda e o atrito superficial. Tais parâmetros orientam decisões de conservação e reabilitação, garantindo que o desempenho operacional esteja de acordo com as exigências de segurança e conforto (Hallack, 2008). No contexto normativo, o dimensionamento dos pavimentos é baseado em métodos empíricos, mecanístico-empíricos e mecanísticos puros. O método empírico, derivado do AASHO *Road Test* e adaptado pelo DNER, é o mais utilizado no Brasil, embora estudos, como os de Hallack (2008) defendam a adoção de abordagens computacionais e simulações numéricas mais precisas.

Dentre as diferentes tipologias de pavimentos empregadas no contexto rodoviário brasileiro, a pavimentação asfáltica apresenta-se como a solução predominante, em razão de sua ampla aplicação e de suas características construtivas e operacionais. Considerando que este trabalho tem como foco a análise da viabilidade técnica dessa tipologia no trecho rodoviário Mariana–Ouro Preto, a seção seguinte dedica-se ao aprofundamento dos aspectos conceituais, construtivos e de desempenho associados ao pavimento asfáltico. Posteriormente, a pavimentação de concreto é abordada de forma complementar, permitindo situar essa solução no conjunto das tipologias existentes.

2.3 PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

A pavimentação asfáltica é definida como o conjunto de técnicas e processos que resultam na construção de um revestimento superficial composto por misturas betuminosas aplicadas sobre camadas estruturais inferiores, com a finalidade de resistir às solicitações impostas pelo tráfego veicular e pelas condições ambientais (Bernucci *et al.*, 2008). O termo “asfalto” refere-se, tecnicamente, ao ligante betuminoso de origem natural ou derivado do refino do petróleo, cuja função principal é conferir coesão à mistura e garantir impermeabilidade ao sistema. O material asfáltico, quando devidamente misturado a agregados minerais graduados, compõe o concreto betuminoso, utilizado como revestimento em vias urbanas e rodovias (Bernucci *et al.*, 2008).

As misturas asfálticas podem ser classificadas em função da temperatura de aplicação, do tipo de ligante empregado e da natureza dos agregados. As misturas a quente, mais comuns, requerem aquecimento do ligante e dos agregados, proporcionando boa trabalhabilidade e desempenho estrutural elevado. As misturas mornas e frias, por sua vez, visam reduzir o consumo energético e as emissões atmosféricas, sendo utilizadas principalmente em serviços de manutenção, recapeamento ou em regiões de difícil acesso. Em relação à composição, as misturas podem ser do

tipo densa, drenante, aberta ou descontínua, conforme a distribuição granulométrica dos agregados e a finalidade do revestimento (Rodrigues *et al.*, 2010).

O pavimento asfáltico pertence à categoria dos pavimentos flexíveis, caracterizando-se pelo comportamento elástico ou viscoelástico sob a ação das cargas móveis. A distribuição dos esforços ocorre de forma progressiva das camadas superiores para as inferiores, sendo o revestimento responsável por suportar a maior parcela das tensões verticais induzidas pelo tráfego (Bernucci *et al.*, 2008). A resposta estrutural do sistema depende da rigidez e da espessura de cada camada, da qualidade dos materiais empregados, da compactação durante a execução e das condições de aderência entre interfaces. O desempenho mecânico também está condicionado às variações térmicas e à frequência de solicitação, exigindo, portanto, especificações compatíveis com o clima local e o volume Diário Médio de Veículos Pesados (VDMP) (Bernucci *et al.*, 2008).

Entre as características técnicas mais relevantes, destaca-se a capacidade de acomodação às deformações impostas pelas cargas repetidas, sem que ocorra ruptura prematura da estrutura. A deformabilidade do ligante permite a redistribuição das tensões, reduzindo a propagação de trincas e fissuras (Borges e Peixoto, 2024). Essa característica, contudo, impõe a necessidade de intervenções periódicas, uma vez que o material sofre envelhecimento oxidativo, o que compromete sua viscosidade, ductilidade e resistência à fadiga. A fadiga cumulativa é uma das principais causas de falha funcional, sendo progressivamente agravada pela ação de água e pela movimentação de cargas excêntricas (Bernucci *et al.*, 2008).

Outra propriedade fundamental do revestimento asfáltico é a impermeabilidade relativa ao fluxo de água. A presença de microvazios e a descontinuidade entre partículas agregadas podem favorecer a penetração de umidade, comprometendo a coesão da mistura e a integridade das camadas inferiores. Para minimizar esse risco, especifica-se um teor ideal de ligante e se adota o controle rigoroso do grau de compactação. A porosidade do revestimento influencia diretamente a suscetibilidade à deformação permanente (afundamento de trilha de roda), à formação de buracos por bombeamento hidráulico e à perda de textura superficial (Rodrigues *et al.*, 2010).

A aderência entre os pneus e o pavimento, definida tecnicamente como atrito superficial, é outra característica crítica da camada asfáltica. Esse parâmetro é determinado pela macrotextura (forma, tamanho e distribuição dos agregados) e pela microtextura (rugosidade da superfície dos grãos minerais). A manutenção de níveis adequados de atrito é essencial para a segurança viária, especialmente em trechos de frenagem intensa, curvas e aclives. O desgaste natural dos agregados

e a exsudação de ligante em temperaturas elevadas reduzem a textura e, por conseguinte, o coeficiente de atrito, exigindo procedimentos de retexturização ou recapeamento (Rodrigues *et al.*, 2010).

A pavimentação asfáltica apresenta ainda vantagens logísticas e operacionais, como a possibilidade de execução em etapas, a rápida liberação ao tráfego, a adaptabilidade a diferentes geometrias e a facilidade de reaproveitamento por meio de processos de fresagem e reciclagem. O caráter modular das camadas permite intervenções localizadas, sem necessidade de reconstrução integral. No entanto, a eficácia das técnicas de reabilitação depende da correta avaliação das patologias existentes, da compatibilidade entre os materiais utilizados e da preservação das propriedades mecânicas do ligante, que se degradam com o tempo e a exposição ambiental (Teles *et al.*, 2023).

A versatilidade das misturas betuminosas possibilita sua aplicação em diferentes contextos, como rodovias de alto volume, vias urbanas, aeroportos, estacionamentos e pátios industriais. Cada tipo de aplicação requer dosagem específica dos constituintes da mistura, controle tecnológico rigoroso e métodos adequados de compactação e acabamento (Borges e Peixoto, 2024). A variabilidade dos agregados disponíveis, bem como as características reológicas dos ligantes asfálticos (penetrabilidade, ponto de amolecimento, viscosidade), impõem desafios técnicos ao projeto e à execução, tornando essencial o uso de ensaios laboratoriais padronizados, como o ensaio Marshall, o ensaio de fluência e o ensaio de módulo resiliente (Teles *et al.*, 2023).

Apesar de largamente adotada no Brasil, este tipo de pavimentação demanda constante atualização tecnológica para responder às novas exigências de tráfego, sustentabilidade e durabilidade. O surgimento de ligantes modificados com polímeros, borracha moída, fibras e aditivos químicos ampliou o leque de soluções disponíveis, permitindo o ajuste das propriedades da mistura às condições específicas de uso. Essas inovações exigem revisão das normas técnicas vigentes, formação contínua de profissionais e aprimoramento dos métodos de controle de qualidade em campo (Teles *et al.*, 2023).

Dessa forma, os aspectos conceituais apresentados evidenciam que o desempenho e a durabilidade dos pavimentos asfálticos resultam da interação entre propriedades dos materiais, condições de execução e solicitações impostas pelo tráfego e pelo ambiente. A compreensão desses fatores é fundamental para a análise da viabilidade técnica da solução asfáltica, uma vez que eles influenciam diretamente o dimensionamento estrutural, a necessidade de intervenções ao longo da

vida útil e o comportamento do pavimento em condições operacionais específicas, como as observadas no trecho Mariana–Ouro Preto.

2.3.1 Implementação

O processo de implementação envolve um conjunto de etapas interdependentes que exigem planejamento técnico, controle tecnológico e adequação às condições geotécnicas, climáticas e operacionais do local de aplicação. A execução eficiente da pavimentação depende da compatibilidade entre projeto, materiais, equipamentos e procedimentos construtivos, devendo seguir normas técnicas e diretrizes estabelecidas por órgãos competentes, como o DNIT e a ABNT.

A etapa preliminar consiste na preparação do subleito, que corresponde à camada de solo natural ou compactado sobre a qual serão assentadas as camadas estruturais do pavimento. O subleito deve ser adequadamente escarificado, homogeneizado, nivelado e compactado, de modo a atingir parâmetros mínimos de suporte e deformabilidade, conforme estabelecido pelos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC), compactação Proctor e módulo de resiliência. A uniformidade do subleito é essencial para evitar recalques diferenciais, trincas refletidas e perda de capacidade estrutural da via (DNIT, 2025).

A seguir, são executadas as camadas intermediárias do pavimento, denominadas sub-base e base. A sub-base tem função complementar de suporte, regularização e proteção do subleito, podendo ser composta por solos melhorados, brita graduada ou materiais estabilizados com cimento, cal ou outros aditivos (Borges e Peixoto, 2024). A base, por sua vez, deve possuir elevada capacidade de suporte e resistência ao cisalhamento, sendo usualmente constituída por brita graduada simples (BGS), brita graduada tratada com cimento (BGTC) ou agregado reciclado, conforme a categoria funcional da via. Ambas as camadas devem ser aplicadas com controle rigoroso de espessura, umidade ótima e grau de compactação, utilizando-se rolos vibratórios, lisos ou pneu, conforme o tipo de material (DNIT, 2025).

Concluída a preparação das camadas de suporte, inicia-se a etapa de execução da camada de rolamento, formada por misturas asfálticas usinadas a quente, morna ou fria, conforme a especificação do projeto. O processo de usinagem ocorre em central apropriada, onde os agregados são aquecidos, dosados, misturados ao ligante asfáltico e transportados até o local de aplicação em temperatura compatível com a faixa de trabalhabilidade. A temperatura de descarga, o tempo de

transporte e a perda térmica durante o trajeto devem ser rigorosamente monitorados, a fim de garantir a homogeneidade da mistura e sua adequada compactação (Balduino e Cosmo, 2022).

A aplicação da mistura asfáltica é realizada com o auxílio de vibroacabadoras, equipamentos que distribuem e pré-compactam a camada em espessura e largura uniformes. A regularidade da aplicação é essencial para assegurar os parâmetros de macrotextura, espessura final e perfil transversal. Após a aplicação, inicia-se a etapa de compactação definitiva, executada em fases sucessivas com rolos metálicos e pneumáticos, respeitando-se a janela térmica recomendada para garantir a densidade exigida sem provocar segregações ou deslocamentos longitudinais (Bernucci *et al.*, 2008).

Durante a implementação, são adotadas medidas de controle tecnológico em todas as etapas, abrangendo a caracterização dos materiais, o controle da dosagem da mistura, a verificação da granulometria dos agregados, a temperatura do ligante, a viscosidade, a massa específica aparente da mistura compactada e o grau de compactação. Ensaio laboratoriais e *in situ*, como o ensaio de extração de ligante, o ensaio de estabilidade Marshall e o ensaio de densidade nuclear, são utilizados para garantir conformidade com os critérios técnicos estabelecidos em projeto (Bernucci *et al.*, 2008).

As juntas de construção, tanto longitudinais quanto transversais, requerem atenção específica no processo de implementação, devendo ser executadas com técnicas que garantam a continuidade estrutural e a estanqueidade do revestimento (Pinto, 2017). O tratamento das bordas, o alinhamento correto das passadas de rolo e a execução de selagem com ligante emulsificado são procedimentos fundamentais para evitar infiltrações e delaminações nas interfaces entre camadas ou entre trechos distintos (Bernucci *et al.*, 2008).

A execução da pavimentação asfáltica também requer integração com os dispositivos de drenagem, tais como sarjetas, bocas de lobo e valetas, cuja eficiência afeta diretamente a durabilidade do pavimento. A água, ao infiltrar-se nas camadas inferiores, reduz a resistência ao cisalhamento e promove o bombeamento de finos, resultando em perda de suporte e falhas localizadas. Por essa razão, a coordenação entre a equipe de pavimentação e os responsáveis pela drenagem deve ser contínua e precisa (DNIT, 2025).

A implementação em áreas urbanas, vias de tráfego intenso ou rodovias concessionadas impõe desafios logísticos adicionais, como a necessidade de fases noturnas, bloqueios parciais de pista, controle de tráfego e execução sob tráfego. Nestes casos, a programação precisa, o uso de

tecnologia de pavimentadoras com sensores automáticos e o planejamento das etapas de fresagem e recapeamento tornam-se imprescindíveis para evitar interrupções e garantir a qualidade do serviço (DNIT, 2025).

Cabe destacar que o sucesso da implementação está diretamente vinculado à qualificação da equipe técnica, à capacidade operacional dos equipamentos e à adoção de boas práticas de gerenciamento de obras. A ausência de um controle tecnológico eficaz compromete a homogeneidade da mistura, a estabilidade volumétrica da estrutura e o desempenho funcional do pavimento ao longo do tempo (Bernucci *et al.*, 2008).

2.3.2 Durabilidade e Desempenho

A durabilidade e o desempenho de pavimentos asfálticos são atributos centrais no planejamento e na gestão da infraestrutura viária, pois influenciam diretamente os custos de manutenção, a segurança dos usuários e a eficiência da circulação. Esses parâmetros resultam da interação entre fatores estruturais, ambientais, mecânicos e operacionais, devendo ser avaliados sob uma perspectiva multidimensional, que considere a resposta do sistema às solicitações impostas ao longo de sua vida útil (Carvalho, 2007).

A durabilidade é definida como a capacidade do pavimento de manter suas características funcionais e estruturais dentro de limites aceitáveis por um período predeterminado, sem a ocorrência de falhas críticas. Essa propriedade está relacionada à resistência da estrutura às ações do tráfego, aos efeitos das intempéries, ao envelhecimento dos materiais e à qualidade da execução. Já o desempenho é entendido como a resposta do pavimento às exigências funcionais, como regularidade superficial, aderência, capacidade de suporte e conforto de rolamento, sendo monitorado por meio de indicadores técnicos objetivos e mensuráveis (Salomão e Froés, 2020).

Entre os fatores que influenciam a durabilidade, destaca-se a qualidade dos materiais empregados na mistura asfáltica. O ligante asfáltico, por exemplo, deve apresentar propriedades reológicas compatíveis com o regime térmico da região e com a frequência de carregamento do tráfego. A resistência ao envelhecimento oxidativo, a estabilidade térmica e a adesividade do ligante são determinantes na prevenção de trincas por retração térmica, exsudação superficial e perda de coesão. Agregados minerais com granulometria bem graduada, alta resistência à fragmentação e baixo teor de partículas friáveis também são essenciais para garantir a estabilidade volumétrica da mistura e sua resistência à deformação permanente (Salomão e Froés, 2020).

O projeto estrutural da pavimentação deve ser dimensionado considerando os níveis de tráfego previstos, a carga por eixo e a frequência de solicitações. O superdimensionamento ou o subdimensionamento da espessura das camadas resulta, respectivamente, em custos excessivos ou em falhas precoces. Métodos de dimensionamento baseados em modelos mecanísticos-empíricos permitem estimar a vida útil do pavimento com base em critérios de fadiga da camada de revestimento, deformação permanente nas camadas inferiores e limite admissível de deflexão. A utilização de *programas* de simulação estrutural, como o MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), permite prever o comportamento da estrutura em diferentes cenários operacionais (Salomão e Froés, 2020).

A execução das camadas é outro aspecto crítico para a durabilidade. Irregularidades no processo de compactação, segregação de agregados, variações de temperatura da mistura durante a aplicação e falhas nas juntas longitudinais e transversais comprometem a uniformidade estrutural da camada e aceleram o processo de degradação. Ensaio de controle de qualidade, como os de densidade *in situ*, teor de ligante, granulometria e estabilidade Marshall, são fundamentais para garantir a conformidade da execução com o projeto. A ausência de controle tecnológico adequado reduz a resistência da estrutura a esforços de cisalhamento e acelera a manifestação de patologias (Carvalho, 2007).

A infiltração de água na estrutura é um dos principais agentes de degradação dos pavimentos asfálticos. A umidade reduz a coesão entre os componentes da mistura, promove o bombeamento de finos das camadas inferiores, provoca o inchamento de solos argilosos e favorece a propagação de trincas por fadiga. A eficiência dos sistemas de drenagem superficial e subsuperficial é, portanto, determinante para a longevidade da via. A adoção de materiais drenantes, a correta execução das valetas e o uso de camadas selantes impermeabilizantes são estratégias utilizadas para mitigar os efeitos da água sobre a estrutura do pavimento (Hallack, 2008).

O desempenho funcional do pavimento asfáltico é avaliado por meio de indicadores como o Índice de Irregularidade Internacional (IRI), que mede a regularidade longitudinal da superfície; a profundidade de trilha de roda, que indica a deformação permanente provocada pelo tráfego repetido; o coeficiente de atrito, que afeta a aderência entre pneu e pavimento; e o índice de condição do pavimento (PCI), que integra informações sobre trincas, buracos, exsudações e desagregações. Esses indicadores são coletados por meio de levantamentos visuais, equipamentos

automatizados e sensores embarcados, sendo utilizados na definição de estratégias de conservação, reabilitação ou reconstrução (Hallack, 2008).

O envelhecimento do ligante asfáltico é um fenômeno natural que afeta negativamente a durabilidade da camada de rolamento. Esse processo ocorre por oxidação, volatilização de componentes leves e endurecimento progressivo do ligante, reduzindo sua flexibilidade e aumentando sua suscetibilidade à trinca. A modificação do ligante com polímeros, borracha de pneus reciclados e aditivos antioxidantes é uma prática adotada para retardar esse processo e melhorar a resistência à fadiga e à deformação plástica. Ensaio como o *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) e o *Pressure Aging Vessel* (PAV) são empregados para simular o envelhecimento acelerado e avaliar o desempenho futuro da mistura (Hallack, 2008).

A resposta do pavimento às cargas dinâmicas também está relacionada à capacidade de recuperação elástica da estrutura, medida pelo módulo de resiliência das camadas. Camadas com baixo módulo de resiliência absorvem esforços excessivos, gerando deflexões acumuladas e colapsos localizados. O monitoramento do desempenho estrutural ao longo do tempo permite a identificação precoce de pontos críticos e a realização de intervenções preventivas, como selagem de trincas, recapeamento ou reforço estrutural. A implantação de sistemas de gerenciamento de pavimentos (SGP), com base em banco de dados georreferenciado, histórico de manutenção e modelagem preditiva, tem se mostrado eficaz na racionalização dos recursos e no prolongamento da vida útil das rodovias (Balduino e Cosmo, 2022).

A durabilidade do pavimento também está relacionada à variabilidade climática. Em regiões com grandes amplitudes térmicas, é comum a ocorrência de trincas por contração e expansão, exigindo a especificação de ligantes com faixa de temperatura de desempenho adequada (PG – *Performance Grade*). A ação dos raios ultravioleta, da umidade relativa elevada e das altas temperaturas contribui para a degradação oxidativa do ligante, sendo necessário adotar materiais resistentes ao envelhecimento térmico e químico. Em regiões tropicais, o uso de misturas com agregados basálticos e ligantes modificados com elastômeros tem se mostrado mais eficaz do que formulações convencionais (Balduino e Cosmo, 2022).

Por fim, a interface entre o desempenho técnico e a gestão pública da infraestrutura é fundamental. A durabilidade projetada só é alcançada se houver planejamento adequado das intervenções, financiamento contínuo das ações de conservação e capacitação técnica das equipes responsáveis. A ausência de políticas públicas de longo prazo, o financiamento intermitente e a

fragmentação institucional reduzem a eficácia das ações de manutenção e reabilitação, comprometendo o desempenho global da malha rodoviária.

2.3.3 Impactos Ambientais

A pavimentação asfáltica, embora amplamente empregada em sistemas viários devido à sua versatilidade, desempenho estrutural e viabilidade econômica, gera impactos ambientais relevantes ao longo de todo o seu ciclo de vida (Azevedo, 2019). Esses efeitos abrangem as fases de extração de matérias-primas, produção, transporte, execução, uso e manutenção, exigindo análise técnica criteriosa e integrada para mitigar danos ambientais diretos e indiretos (Krau *et al.*, 2022).

Na fase inicial do ciclo produtivo, o impacto ambiental mais expressivo relaciona-se à extração de agregados minerais. A retirada de brita, areia e cascalho implica a modificação de perfis geológicos, desmatamento de áreas naturais, alteração de cursos d'água e produção de resíduos sólidos. As atividades de mineração provocam, ainda, a emissão de partículas em suspensão (material particulado), além da compactação do solo e da redução da permeabilidade natural, com consequente alteração do regime hidrológico local. O impacto dessas atividades varia conforme a escala da obra, a distância entre a jazida e o canteiro e a logística de transporte adotada (Azevedo, 2019).

No que diz respeito ao ligante asfáltico, a principal matéria-prima, o CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), é derivada do refino de petróleo bruto, sendo, portanto, um insumo não renovável e com elevado potencial poluidor. A produção e o refino do petróleo envolvem processos termomecânicos de alta intensidade energética, com emissão significativa de gases de efeito estufa, especialmente dióxido de carbono (CO₂), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs). Além disso, durante o armazenamento e manuseio do CAP, ocorrem emissões evaporativas que podem afetar a qualidade do ar e a saúde ocupacional dos trabalhadores (Azevedo, 2019).

A etapa de usinagem da mistura asfáltica constitui outra fonte significativa de impacto ambiental. A produção de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) requer temperaturas elevadas, geralmente entre 140°C e 160°C, o que demanda consumo intensivo de combustíveis fósseis, como óleo diesel ou gás natural. Esse processo contribui para o aumento da pegada de carbono da obra, além de gerar emissões atmosféricas contendo hidrocarbonetos aromáticos, partículas finas e gases nocivos à saúde humana. Embora alternativas mais sustentáveis, como a

mistura morna (*warm mix asphalt*), venham sendo desenvolvidas, sua adoção ainda é limitada no Brasil em razão de custos, disponibilidade tecnológica e desconhecimento técnico (Azevedo, 2019).

O transporte dos materiais, desde a origem até o local de aplicação, representa parcela relevante da carga ambiental associada à pavimentação asfáltica. Os deslocamentos em longas distâncias intensificam o consumo de combustível, aumentam as emissões de CO₂ e provocam desgaste da infraestrutura viária preexistente. Além disso, o tráfego intenso de caminhões pode gerar ruído ambiental, comprometendo a qualidade de vida de populações adjacentes e a fauna local. O planejamento logístico ineficiente, a má conservação dos veículos de transporte e a ausência de rotas alternativas agravam os efeitos dessa etapa (Krau *et al.*, 2022).

Durante a execução da pavimentação, ocorrem emissões difusas de material particulado, ruído de máquinas e vibrações que afetam diretamente o meio antrópico e natural. A operação de vibroacabadoras, rolos compactadores, caminhões betoneiras e aquecedores contribui para a poluição atmosférica e sonora. A geração de resíduos sólidos, como sobras de mistura, embalagens e materiais descartáveis, também deve ser considerada. Em casos de acidentes com derramamento de CAP ou emulsões asfálticas, pode haver contaminação de solo e cursos d'água, exigindo protocolos rigorosos de contenção e remediação (Azevedo, 2019).

Após a execução, o pavimento asfáltico continua a impactar o meio ambiente por meio de efeitos indiretos relacionados ao uso e à manutenção da via. A superfície escura do revestimento, composta por materiais com alta absorção térmica, contribui para a intensificação do fenômeno conhecido como “ilha de calor”, particularmente em áreas urbanas densamente pavimentadas. A elevação da temperatura superficial pode influenciar microclimas, afetar a saúde pública e aumentar o consumo energético relacionado ao resfriamento artificial de edificações. A substituição de áreas verdes por superfícies impermeáveis compromete a infiltração de água no solo, ampliando o escoamento superficial, sobrecarregando redes pluviais e favorecendo a ocorrência de enchentes (Cavalet *et al.*, 2019).

A impermeabilidade do pavimento asfáltico também tem implicações ecológicas. A redução da infiltração hídrica prejudica a recarga de aquíferos e o equilíbrio do ciclo hidrológico, além de acelerar a velocidade de escoamento das águas pluviais, o que pode intensificar processos erosivos em margens de rios e córregos. A qualidade da água de escoamento superficial é frequentemente comprometida pela presença de hidrocarbonetos, metais pesados e resíduos de

pneus, freios e combustíveis, que se acumulam sobre a superfície do pavimento e são arrastados durante as chuvas (Cavalet *et al.*, 2019).

No tocante às práticas de conservação e reabilitação, também se observam impactos ambientais expressivos. Intervenções como fresagem, recapeamento, selagem de trincas e aplicação de novas camadas de rolamento requerem o uso de recursos naturais, energia e insumos químicos. A fresagem de pavimentos antigos, por exemplo, gera resíduos asfálticos que, se não forem devidamente reaproveitados, podem se acumular em bota-foras ou causar passivos ambientais. A reciclagem *in situ* e o uso de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) constituem estratégias mitigadoras que reduzem a demanda por matéria-prima virgem e os impactos associados à deposição inadequada de resíduos (Krau *et al.*, 2022).

A gestão ambiental da pavimentação asfáltica exige, portanto, a adoção de práticas sustentáveis baseadas no conceito de ciclo de vida. A Análise de Ciclo de Vida (ACV) permite quantificar os impactos ambientais associados a cada fase do processo, identificando pontos críticos e subsidiando decisões técnicas mais adequadas. O uso de materiais alternativos, a adoção de ligantes modificados com polímeros reciclados, a substituição de agregados naturais por reciclados, a incorporação de pavimentos drenantes e a implementação de técnicas de construção a frio são exemplos de abordagens que visam reduzir a pegada ambiental do sistema (Costa *et al.*, 2021).

A legislação ambiental brasileira prevê condicionantes para a execução de obras de pavimentação, especialmente no que diz respeito ao licenciamento, à compensação ambiental e à mitigação de impactos. Órgãos como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), as secretarias estaduais e municipais de meio ambiente, e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) são responsáveis por normatizar, autorizar e fiscalizar intervenções em áreas sensíveis, exigindo estudos de impacto ambiental (EIA), relatórios de impacto (RIMA) ou procedimentos simplificados, conforme a magnitude da obra (Costa *et al.*, 2021).

Por fim, a pavimentação asfáltica deve ser compreendida como um processo técnico que demanda compatibilização com os princípios da engenharia ambiental, da sustentabilidade e da gestão integrada de recursos. A mitigação de seus impactos depende da escolha criteriosa de tecnologias, da racionalização do consumo de materiais, da capacitação de profissionais e da incorporação de critérios ambientais no processo decisório de planejamento e execução. Nesse

sentido, verifica-se que, embora consolidada como solução eficiente para a infraestrutura viária, a pavimentação asfáltica apresenta impactos ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida, envolvendo consumo de recursos naturais, emissões atmosféricas, alterações hidrológicas e geração de resíduos. Tais efeitos, contudo, não inviabilizam sua aplicação, desde que considerados de forma integrada nas etapas de projeto e obra. A adoção de práticas como otimização logística, controle operacional, reciclagem de materiais e utilização de tecnologias construtivas mais sustentáveis evidencia o potencial de mitigação desses impactos, permitindo compatibilizar desempenho estrutural, durabilidade e responsabilidade ambiental no contexto do estudo.

2.4 PAVIMENTAÇÃO DE CONCRETO

O pavimento de concreto constitui uma das soluções estruturais mais relevantes na engenharia rodoviária contemporânea, destacando-se por sua elevada durabilidade, resistência mecânica e estabilidade funcional frente às solicitações do tráfego e às variações ambientais. Diferentemente dos sistemas flexíveis, é classificado como rígido devido ao comportamento estrutural de suas placas, que distribuem as tensões verticais sobre uma área ampla, reduzindo significativamente as solicitações nas camadas inferiores (Kostulski, 2015). O concreto Portland, principal material empregado, confere à estrutura propriedades físico-químicas que resultam em alta resistência à compressão, baixa deformabilidade e longevidade mesmo em contextos severos de operação (Carvalho, 2007).

O funcionamento estrutural dessas placas depende da integridade monolítica do concreto e da interação controlada com as camadas de base e sub-base, responsáveis pelo suporte complementar e pela regularização do subleito. Essa concepção exige que o dimensionamento das espessuras seja cuidadosamente ajustado conforme o volume de tráfego, as características geotécnicas e a vida útil prevista (Carvalho, 2007). As juntas transversais e longitudinais, por sua vez, têm papel essencial no controle das fissuras de retração e dilatação térmica, devendo ser dispostas em intervalos regulares e com profundidade adequada para permitir o livre movimento das placas sem perda de desempenho estrutural (Carvalho, 2007).

A resistência à deformação permanente é uma das marcas do pavimento de concreto, pois apresenta baixa suscetibilidade à formação de trilhas de roda e à ação concentrada de cargas. Essa característica o torna especialmente indicado para corredores logísticos, pátios de carga, terminais intermodais e vias urbanas de tráfego intenso (Hallack, 2008). A durabilidade do material está

relacionada à resistência à compressão (frequentemente superior a 30 Mpa) e à estabilidade dimensional garantida pela dosagem adequada e pelo controle da retração. Em certos casos, a aderência entre o concreto e a base é propositalmente reduzida por meio de camadas de separação, permitindo que as placas se movimentem de modo independente e evitando tensões internas excessivas (Cavalet *et al.*, 2019).

Nesse sentido, o acabamento superficial desempenha funções tanto estruturais quanto funcionais. A textura obtida por escovamento, ranhuramento ou aplicação de texturas mecanizadas assegura o atrito necessário à frenagem, facilita o escoamento de água e reduz o risco de aquaplanagem. A refletância luminosa do concreto, por sua vez, contribui para temperaturas superficiais mais baixas e para maior eficiência luminosa, o que favorece a economia de energia em vias urbanas. Entretanto, cuidados devem ser tomados para evitar o ofuscamento noturno decorrente do excesso de brilho (Kostulski, 2015). O comportamento térmico, fortemente dependente de seu coeficiente de dilatação e de sua umidade interna, exige técnicas de cura bem planejadas, capazes de prevenir retrações e fissurações. Procedimentos como a cura úmida e o lançamento das placas em horários de menor insolação reduzem os impactos térmicos e aumentam a estabilidade do pavimento (Kostulski, 2015).

Já a execução do pavimento de concreto envolve etapas sucessivas e interdependentes que demandam precisão técnica e controle rigoroso dos materiais. O processo inicia-se com a preparação do subleito, que deve apresentar suporte uniforme e compactação próxima de 100% do Proctor Normal ou Modificado. Em seguida, são executadas as camadas de base e sub-base, geralmente compostas por materiais estabilizados com cimento ou brita graduada tratada, garantindo regularidade geométrica e resistência à erosão (Maia, 2022). O lançamento do concreto é realizado com o auxílio de pavimentadoras deslizantes (*slipform pavers*), que moldam e adensam o material simultaneamente, conferindo maior produtividade e precisão ao processo. Em obras de menor porte ou com geometrias complexas, podem ser utilizadas formas convencionais.

No que diz respeito à composição do concreto para pavimentação, esta requer agregados resistentes à abrasão, cimento Portland e aditivos compatíveis com as condições climáticas locais. A dosagem deve assegurar resistência mínima de 30 MPa e baixa permeabilidade. Ensaio de abatimento, resistência à compressão e módulo de elasticidade garantem a conformidade da mistura (Cavalet *et al.*, 2019). Durante a execução, barras de transferência são instaladas nas juntas transversais para distribuir uniformemente as cargas entre as placas, enquanto barras de amarração

em juntas longitudinais mantêm o alinhamento e a solidariedade estrutural (Kostulski, 2019). A cura seja química, com compostos de parafina e resina, ou úmida, com lonas impermeáveis, é essencial para controlar a evaporação da água e assegurar resistência e durabilidade (Maia, 2022).

A liberação do tráfego sobre o pavimento de concreto ocorre somente após o atingimento da resistência mínima especificada em projeto. A antecipação dessa etapa pode induzir patologias irreversíveis, como fissuras e desagregação superficial. O processo de implementação também contempla a execução de dispositivos complementares, como sarjetas, juntas serradas e canaletas de drenagem, cuja interface com o pavimento deve ser rigorosamente tratada para evitar infiltrações e desníveis. Tecnologias emergentes, como pavimentos pré-moldados e sistemas de concretagem monitorados por sensores em tempo real, têm modernizado a execução, reduzindo prazos e aumentando a precisão dimensional, embora exijam mão de obra altamente qualificada e controle logístico rigoroso (Kostulski, 2019).

O desempenho dos pavimentos de concreto está diretamente ligado à interação entre seus componentes e ao controle das variáveis construtivas. A durabilidade, compreendida como a capacidade de manter a integridade e funcionalidade ao longo do tempo, depende de fatores estruturais, ambientais e operacionais. A resistência à compressão e à tração na flexão do concreto é o principal parâmetro determinante de sua vida útil, assim como o módulo de elasticidade e a retração por secagem, que influenciam o surgimento de microfissuras (Severi, 2002). A existência de juntas bem projetadas garante o desempenho estrutural e o controle da dilatação térmica. Em contrapartida, juntas mal executadas provocam falhas de borda, arrancamentos e trincas reflexivas (Cervo, 2004).

O concreto se destaca por sua baixa suscetibilidade à deformação permanente e à fadiga, propriedades que o tornam adequado a vias de tráfego pesado e condições operacionais extremas. No entanto, a eficiência estrutural depende da homogeneidade da fundação, uma vez que recalques diferenciais podem comprometer a estabilidade das placas (Maia, 2022). O desempenho funcional é medido por indicadores como o Índice de Irregularidade Internacional (IRI), que avalia a regularidade da superfície e orienta intervenções preventivas. Valores elevados de IRI indicam perda de conforto e aumento de custos operacionais, demandando retexturização ou substituição de placas (Marin *et al.*, 2015).

Do ponto de vista ambiental, o concreto apresenta vantagens e limitações. Sua baixa permeabilidade impede a infiltração de agentes agressivos, como sulfatos e cloretos, mas a

exposição prolongada a ambientes marinhos ou industriais pode causar reação álcali-agregado e corrosão de armaduras. Ensaios de difusividade e resistência à carbonatação são empregados para avaliar sua durabilidade potencial (Severi, 2002). A fadiga estrutural, provocada por solicitações repetidas de tráfego, constitui um dos principais mecanismos de degradação, sendo mitigada pelo uso de concretos reforçados com fibras metálicas ou poliméricas, capazes de aumentar a tenacidade e prolongar o ciclo de vida da estrutura (Cervo, 2004).

Finalmente, a longevidade dos pavimentos de concreto pode superar três décadas quando o projeto estrutural, o controle tecnológico e a conservação preventiva são adequadamente executados. Entretanto, falhas localizadas ou degradação progressiva exigem intervenções específicas, como substituição de placas, aplicação de camadas delgadas de reforço (*whitetopping*) e inserção de barras de amarração ou geogrelhas (Cavalet *et al.*, 2019). O avanço recente de concretos de alto desempenho, concretos permeáveis e compósitos com fibras tem ampliado as possibilidades de aplicação, permitindo soluções mais sustentáveis, resistentes e adaptadas às condições climáticas e operacionais brasileiras.

A apresentação das características estruturais, construtivas e de desempenho dos pavimentos de concreto permite situar essa tipologia no conjunto das soluções rodoviárias disponíveis, destacando seus potenciais técnicos e suas limitações operacionais. Embora não constitua o foco principal deste trabalho, o pavimento de concreto é analisado de forma complementar, possibilitando uma leitura comparativa em relação à pavimentação asfáltica e contribuindo para a compreensão dos critérios que orientam a escolha da solução mais adequada ao trecho Mariana–Ouro Preto.

2.5 SÍNTESE CRÍTICA DA LITERATURA

A literatura nacional sobre pavimentação rodoviária tem avançado nas últimas décadas como um campo técnico-científico robusto, permeado por discussões que abarcam desde os fundamentos do comportamento estrutural dos pavimentos até os avanços recentes em métodos de dimensionamento e monitoramento de desempenho. Como demonstrado, pesquisadores como Hallack (2008), Kostulski (2015), Cavalet *et al.* (2019) e Maia (2022) vêm contribuindo de forma expressiva para o entendimento dos fatores que influenciam a durabilidade e a eficiência estrutural das infraestruturas viárias brasileiras, especialmente sob condições de tráfego intenso e variabilidade climática acentuada. Esses estudos destacam a importância da escolha criteriosa dos

materiais, da adequação do método construtivo e do controle tecnológico como elementos indispensáveis à longevidade e à segurança operacional das rodovias, com especial relevância para sistemas de pavimentação asfáltica.

Entretanto, observa-se que as pesquisas ainda permanecem concentrada em análises descritivas ou comparativas de desempenho entre pavimentos flexíveis e rígidos em contextos genéricos, frequentemente desvinculados de particularidades geográficas ou geotécnicas específicas. Embora trabalhos como os de Carvalho (2007) e Severi (2002) tenham contribuído para o avanço conceitual e metodológico na área, ainda são escassas as investigações que aplicam, de forma integrada, diferentes métodos de dimensionamento em cenários complexos, onde o relevo acidentado, as condições climáticas adversas e a heterogeneidade do subleito impõem desafios adicionais ao desempenho estrutural – especialmente no caso dos pavimentos asfálticos submetidos a tráfego misto em regiões montanhosas.

No que se refere aos pavimentos rígidos, autores como Kostula literatura aponta que o pavimento de concreto apresenta elevada durabilidade, resistência mecânica e estabilidade estrutural, decorrentes do comportamento rígido de suas placas e da eficiente distribuição de tensões (Kostulski, 2015). Seu desempenho depende do adequado dimensionamento das espessuras, da correta execução das juntas e da compatibilização com as condições de tráfego e subleito (Carvalho, 2007), além de rigoroso controle tecnológico durante a execução (Cavalet et al., 2019; Maia, 2022). Embora se destaque pela baixa suscetibilidade à deformação permanente (Hallack, 2008), autores como Severi (2002) e Cervo (2004) apontam que falhas construtivas, variações térmicas e recalques diferenciais podem comprometer sua integridade, evidenciando que sua eficiência estrutural está condicionada a exigências técnicas elevadas e adequada adaptação ao contexto de aplicação. Contudo, nesta pesquisa, a abordagem sobre pavimentos de concreto é adotada exclusivamente como contraponto metodológico e referencial comparativo, sem constituir objeto central de análise, uma vez que o foco do estudo permanece na avaliação da viabilidade técnica da pavimentação asfáltica.

Do ponto de vista construtivo, há consenso entre os autores sobre os avanços obtidos com a utilização de equipamentos automatizados, concretos de alto desempenho e controle tecnológico rigoroso (Maia, 2022; Kostulski, 2015). Contudo, a literatura revela uma lacuna em publicações acerca da avaliação da aplicabilidade dessas tecnologias em regiões de topografia acidentada e

acessibilidade restrita, especialmente no que diz respeito à execução e ao desempenho estrutural de revestimentos asfálticos nestas condições geométricas e operacionais.

Dessa forma, constata-se que, apesar da amplitude das discussões teóricas e experimentais sobre sistemas de pavimentação, o diálogo entre método, contexto geotécnico e desempenho ainda não se consolidou de forma consistente na literatura brasileira. Embora a literatura nacional apresente discussões profícuas sobre os sistemas de pavimentação e seus desempenhos, ainda são limitados os estudos aplicados à trechos acidentados, como o de Mariana–Ouro Preto.

Essa lacuna justifica a presente pesquisa, cuja contribuição reside na análise integrada da viabilidade técnica do pavimento asfáltico em um trecho de elevada complexidade geográfica e operacional. Ao aplicar e comparar métodos de dimensionamento usuais em um contexto real, o estudo busca ampliar a compreensão sobre o comportamento estrutural dessa tipologia de pavimento em condições topográficas desafiadoras, contribuindo para o aprimoramento dos critérios técnicos adotados em projetos rodoviários semelhantes. Reitera-se que a menção ao pavimento rígido é realizada exclusivamente como referencial comparativo de natureza metodológica, não constituindo objeto de análise, nem ampliando o escopo da presente pesquisa, cujo enfoque permanece restrito à pavimentação asfáltica.

3. METODOLOGIA

Esta seção pretende descrever, de forma detalhada, os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento da pesquisa, contemplando o delineamento do estudo, a caracterização do trecho analisado e os métodos empregados para o dimensionamento das estruturas de pavimento. Busca-se explicitar as etapas que orientaram a coleta, organização e tratamento dos dados, bem como os critérios técnicos utilizados na aplicação dos métodos empírico e mecanístico-empírico, de modo a assegurar a transparência, a reprodutibilidade e a coerência científica do processo investigativo.

A presente pesquisa adota uma abordagem comparativa de caráter técnico-estrutural, centrada na análise dos sistemas de pavimentação asfáltica convencional. Essa escolha metodológica permite observar semelhanças e diferenças entre esses dois sistemas construtivos a partir de critérios técnicos e estruturais padronizados, aplicáveis ao contexto específico da engenharia rodoviária. Do ponto de vista metodológico, esta investigação classifica-se como uma pesquisa de natureza aplicada, pois objetiva produzir conhecimento voltado à solução de problemas concretos da engenharia de transportes, contribuindo diretamente para o aperfeiçoamento das práticas técnicas no setor da infraestrutura viária. Segundo Gil (2008), pesquisas aplicadas buscam gerar saberes imediatamente utilizáveis, sendo dirigidas à resolução de desafios específicos enfrentados por profissionais e instituições. Nesse sentido, o presente estudo não se limita à produção teórica, visando também oferecer subsídios técnicos que possam orientar a tomada de decisão no que tange à escolha do tipo de pavimento mais adequado para o trecho em análise.

Quanto ao tipo de pesquisa, trata-se de um estudo comparativo, pois busca analisar e confrontar os resultados obtidos a partir de diferentes métodos de dimensionamento aplicados ao pavimento asfáltico, sob condições equivalentes de tráfego e contexto geotécnico. A referência ao pavimento rígido é utilizada apenas de forma contextual, sem constituir objeto direto de dimensionamento neste estudo. De acordo com Marconi e Lakatos (2017), a pesquisa comparativa permite verificar a superioridade relativa entre dois ou mais elementos com base em critérios predefinidos, sendo especialmente útil em estudos de viabilidade técnica. Por meio desse tipo de investigação, torna-se possível estabelecer parâmetros de desempenho e fundamentar, de forma criteriosa, a escolha da solução mais apropriada ao contexto analisado.

A abordagem metodológica, por sua vez, é quanti-qualitativa, uma vez que combina a análise de dados numéricos obtidos por meio de normas técnicas e manuais de dimensionamento com a interpretação técnica dos resultados à luz dos critérios de engenharia. A vertente quantitativa se evidencia na utilização de dados mensuráveis, tais como volume diário de tráfego, taxa de crescimento, período do projeto, fator de veículo, dentre outros. Já a dimensão qualitativa manifesta-se na interpretação técnica das implicações estruturais, construtivas e operacionais observadas em cada modelo de pavimentação, visando compreender as vantagens e limitações técnicas inerentes a cada sistema. Como destaca Creswell (2010), a abordagem quanti-qualitativa é especialmente indicada em estudos aplicados, pois permite uma visão integrada da realidade investigada, unindo rigor técnico e sensibilidade contextual.

3.1 TRECHO ANALISADO

O trecho analisado nesta pesquisa compreende o segmento da rodovia BR-356 que conecta os municípios de Mariana e Ouro Preto (Figura 1), em Minas Gerais. Essa via está inserida em um território de relevância geopolítica e econômica, especialmente em razão do seu papel estratégico na logística de transporte de minério e no deslocamento de fluxos turísticos e acadêmicos. Segundo Faria e Lima (2021), a BR-356 constitui um eixo fundamental para o escoamento da produção minerária do Quadrilátero Ferrífero, destacando-se como rota essencial para a cadeia produtiva da mineração e para o acesso aos centros universitários e patrimoniais da região.

Figura 1 – Trecho Ouro Preto-Mariana (Minas Gerais).



Fonte: Google Maps (2025).

A curta distância entre os municípios, de aproximadamente 11 quilômetros, intensifica o tráfego diário, composto por uma diversidade de modais, com destaque para caminhões de carga pesada, veículos de transporte coletivo e automóveis particulares. Essa condição configura um cenário de elevado estresse estrutural sobre a plataforma viária, o que, conforme salienta Abreu, Santos e Pires (2023), demanda uma infraestrutura pavimentada de alta resistência e desempenho mecânico duradouro para atender à sobrecarga funcional de tráfego misto e contínuo.

Geograficamente, o trecho está inserido em um contexto de topografia montanhosa, caracterizada pela presença do Pico do Itacolomi e por um conjunto de serras e vales abruptos que interferem diretamente nas soluções de engenharia viária. Essa conformação territorial impõe complexidades adicionais no projeto geométrico e na conservação da rodovia. De acordo com Leal (2020), a declividade acentuada e as instabilidades geotécnicas associadas ao relevo montanhoso exigem cuidados especiais no dimensionamento dos pavimentos, nos sistemas de drenagem superficial e profunda, e nas práticas de contenção e controle de processos erosivos.

Do ponto de vista funcional, o trecho é reconhecido pela ocorrência frequente de congestionamentos e sinistros viários, especialmente envolvendo veículos pesados em declives acentuados. Essa condição crítica é amplamente documentada em relatórios do Instituto de Desenvolvimento Integrado de Minas Gerais (INDI, 2022), os quais apontam a urgência de intervenções estruturais na BR-356 como medida mitigadora de riscos operacionais e de melhoria da fluidez do tráfego regional.

Nesse contexto, o governo estadual mineiro elaborou o “Novo Acordo de Mariana”, no qual esse trecho é mencionado como prioritário para investimentos públicos e parcerias privadas. Segundo Moura *et al.* (2023), o plano apresenta previsão de investimentos da ordem de R\$ 5 bilhões em obras de duplicação da via, implantação de acostamentos e faixas adicionais, correções de traçados críticos, construção de passarelas e dispositivos de segurança, com vistas à modernização e à sustentabilidade da malha rodoviária.

Além disso, o processo licitatório do Lote 7 – Via Liberdade, conforme registrado por Minas Gerais (2025) está em curso, com enfoque na concessão administrativa da manutenção e operação do trecho sob padrões técnicos qualificados, atendendo inclusive às demandas de acessibilidade dos distritos adjacentes e à participação comunitária em audiências públicas.

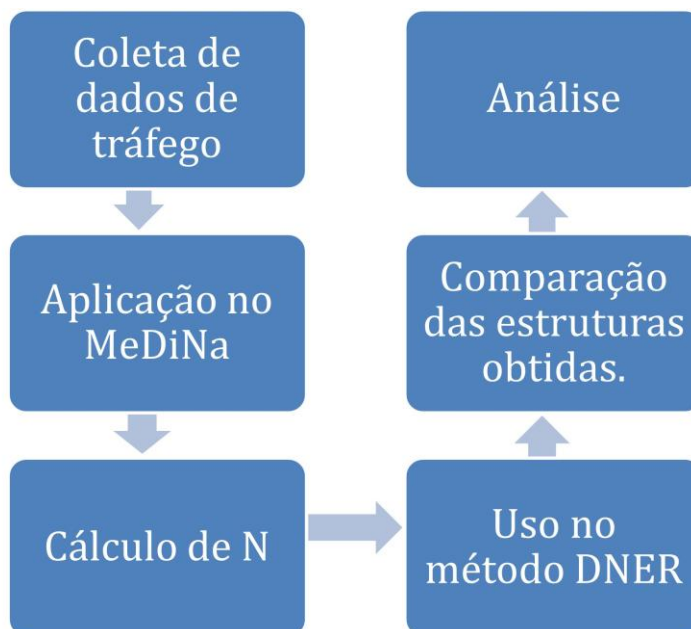
Por isso, a escolha metodológica desse trecho como objeto de estudo técnico-comparativo ocorre devido à sua complexidade funcional e estrutural, aliando alto volume de tráfego, predominância de cargas pesadas, condições geomorfológicas adversas e histórico de acidentes. Esses fatores demandam uma análise criteriosa quanto à viabilidade técnica de soluções pavimentares.

3.2 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Para o desenvolvimento da comparação entre os sistemas de pavimentação, considerando as condições geográficas e operacionais da região, bem como o comportamento mecânico das estruturas ao longo prazo. Foram empregados dois métodos de dimensionamento distintos, amplamente consolidados na prática técnica brasileira: (i) o método mecanístico-empírico, por meio do uso do *software* MeDiNa; e (ii) o método empírico clássico do antigo, atualmente incorporado ao DNIT.

Para a compreensão do percurso metodológico adotado no estudo, a Figura 2 apresenta um fluxograma síntese das principais etapas da metodologia, desde a coleta e tratamento dos dados de tráfego até a aplicação dos métodos de dimensionamento e a comparação das estruturas obtidas.

Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Etapas no MeDiNa: dimensionamento mecânico-empírico

Inicialmente, procedeu-se à coleta e organização dos dados necessários para a simulação computacional no *software* MeDiNa. A partir do Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2022), foi determinado o volume diário médio de tráfego (VDMT) do trecho em estudo. A esse valor foi aplicada uma taxa de crescimento anual estimada em 3%, conforme parâmetros técnicos presentes em estudos similares. Também, adotou-se o período de projeto de 20 anos e a distribuição percentual de veículos na faixa de projeto, conforme as diretrizes normativas vigentes.

Com esses parâmetros, o *software* realizou o cálculo automático do Fator de Veículo (FV) e do número acumulado de solicitações ao pavimento (N total). A partir desses valores, foi modelada uma estrutura inicial de pavimento com camadas-padrão fornecidas pelo MeDiNa. Essa estrutura foi então avaliada quanto aos níveis de desempenho mecânico, sobretudo no que tange ao percentual de área trincada, ao afundamento das trilhas de roda e ao índice de confiabilidade do sistema.

Todos os valores de desempenho foram calculados automaticamente pelo *software* e utilizados unicamente como critérios de verificação do atendimento ou não às condições técnicas mínimas, não sendo, neste momento, considerados como resultado do estudo, mas como parte integrante da lógica metodológica de comparação entre os modelos estruturais.

3.2.2 Etapas no método empírico DNER

Paralelamente, aplicou-se o método empírico tradicional, com base nos antigos critérios do DNER, cuja aplicação ainda é recomendada em determinados casos específicos por sua simplicidade e validação prática. O ponto de partida para esse método foi o valor de N (número de solicitações acumuladas), obtido previamente por meio do *software* MeDiNa. A esse valor foram associados coeficientes de suporte representados pelo índice CBR (*California Bearing Ratio*) das camadas constituintes do pavimento, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - *California Bearing Ratio*.

Camada	Critérios Técnicos
Material de subleito	CBR \geq 2% Expansão menor que 2%
Material para reforço do subleito	CBR maior que o do subleito Expansão menor que 1%
Material para sub-base	CBR \geq 20%

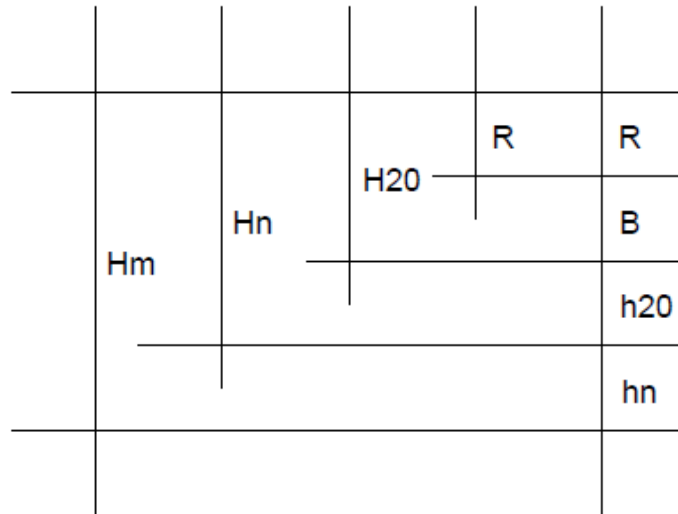
Camada	Crêterios Técnicos
	Expansão menor que 1%
Material para base	CBR \geq 80% Expansão menor que 0,5%

Fonte: Gontijo (2021).

Considerando as características geotécnicas do trecho analisado e a ausência de ensaios de campo específicos, adotaram-se valores de CBR amplamente referenciados na literatura técnica e em manuais de dimensionamento rodoviário nacionais. Assim, foram assumidos os seguintes parâmetros médios de suporte: subleito com CBR de 2%; reforço de subleito com CBR de 12%; sub-base com CBR de 20%; e base com CBR de 80%. Esses valores seguem a faixa de varia o recomendada por Gontijo (2021) e DNIT (2006), compatível com solos argilosos de média a alta plasticidade e materiais granulares estabilizados, frequentemente encontrados em regiões de relevo acidentado e elevado teor de umidade.

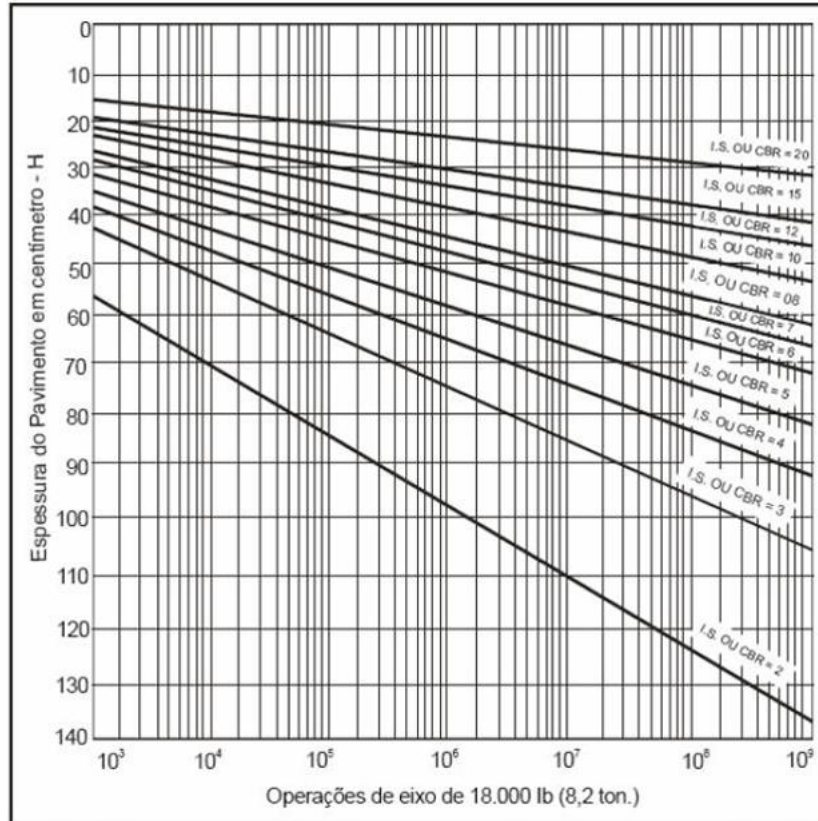
A ado o desses parâmetros foi realizada de modo a representar condi es realistas de desempenho estrutural para o pavimento, garantindo coerência entre os métodos de dimensionamento aplicados. Essa escolha também se alinha às práticas correntes de projeto descritas por Bernucci *et al.* (2010) e Balbo (2013), que apontam o CBR de 2% como limite inferior para materiais de subleito em rodovias de baixo a médio volume de tráfego, enquanto valores de 20% e 80% são indicativos de materiais estabilizados e bases granulares de alta resistência. A partir desses dados, foi utilizado o  baco (Figura 4) para estimar as espessuras das camadas H_{20} , H_n e H_m (Figura 3) correspondentes às profundidades mínimas estruturais em fun o do tráfego e das propriedades mecânicas das camadas e o Quadro 2 para estimar a espessura mínima do revestimento betuminoso (camada R).

Figura 3 – Camadas de método DNER



Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

Figura 4 – Ábaco para estimar as espessuras.



Fonte: Gontijo (2021).

Quadro 2 – Espessura mínima de revestimento betuminoso.

N (número de solicitações acumuladas)	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: Gontijo (2021).

Em linhas gerais, os parâmetros H_{20} , H_n e H_m correspondem a camadas que no método auxiliam para o cálculo das camadas da estrutura. H_{20} representando a camada de revestimento somada à camada de base, H_n correspondendo à camada de revestimento somada à camada de base e sub-base, e H_m referente à camada de revestimento somada à camada de base, sub-base e reforço do subleito. Cada um desses parâmetros utilizando o valor de CBR da camada abaixo.

A utilização combinada dos parâmetros H_{20} , H_n e H_m permite que o projetista verifique a conformidade da estrutura projetada com os limites normativos, garantindo que o pavimento apresente desempenho satisfatório ao longo do ciclo de vida considerado. Dessa forma, esses valores constituem referenciais técnicos fundamentais para o dimensionamento e a avaliação do comportamento estrutural do pavimento, assegurando que a solução adotada atenda aos critérios de segurança, durabilidade e desempenho estabelecidos pelas normas do DNIT e pela literatura especializada.

A utilização do número de solicitações acumuladas (N) obtido por meio do *software* MeDiNa como parâmetro de entrada no método empírico do DNER foi adotada com o objetivo de garantir coerência entre as hipóteses de tráfego consideradas nos dois procedimentos de dimensionamento. Ao empregar uma base comum de carregamento, evita-se a introdução de vieses decorrentes de estimativas independentes de tráfego, permitindo que a comparação entre os métodos se concentre nas diferenças conceituais e estruturais de cada abordagem, e não em discrepâncias associadas aos dados de entrada. Ressalta-se que o parâmetro N representa, em ambos os métodos, o efeito acumulado das solicitações do tráfego ao longo do período de projeto, assegurando a compatibilidade conceitual de sua utilização.

Aplicaram-se, ainda, os coeficientes de contribuição estrutural indicados nos manuais técnicos: $K_r = 2,0$, $K_b = 1,0$, $K_s = 1,0$ e $K_n = 1,0$, para as camadas de revestimento, base, sub-base e reforço de subleito, respectivamente. O coeficiente K_r representa a contribuição estrutural do revestimento betuminoso, responsável por suportar diretamente as tensões de tráfego e distribuir os esforços às camadas inferiores. O coeficiente K_b refere-se à base, cuja função é complementar o suporte estrutural e reduzir a deformação permanente. O coeficiente K_s expressa a capacidade de suporte da sub-base, atuando na dissipação das cargas verticais. Por fim, o coeficiente K_n corresponde ao reforço do subleito, camada de transição que assegura estabilidade e uniformidade ao conjunto estrutural do pavimento (Quadro 3).

Quadro 3 – Coeficientes de equivalência estrutural.

Tipo de Material	Coefficiente de Equivalência Estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento pré-misturado a quente de graduação densa	1,7
Base ou revestimento pré-misturado a frio com graduação densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Camadas granulares	1,0
Solo-cimento com resistência aos 7 dias superior a 4,5 MPa (compressão)	1,7
Solo-cimento com resistência aos 7 dias entre 2,8 e 4,5 MPa (compressão)	1,4
Solo-cimento com resistência aos 7 dias entre 2,1 e 2,8 MPa (compressão)	1,2
Bases de solo-cal	1,2

Fonte: Gontijo (2021).

O coeficiente de 1,2 na equação de H20 foi adotado como um fator adicional de segurança, em conformidade com recomendações presentes no método (DNIT, 2010). Esse coeficiente visa compensar incertezas inerentes aos parâmetros de entrada, como variações nas condições do subleito, desvios construtivos e oscilações no volume de tráfego ao longo do período de projeto. Assim, sua aplicação assegura margem de segurança adequada frente às possíveis discrepâncias

entre o comportamento teórico e o desempenho real do pavimento, reforçando a confiabilidade dos resultados obtidos.

3.3 LIMITAÇÕES DO MÉTODO

Apesar da consistência metodológica e da fundamentação técnica adotadas, este estudo apresenta limitações associadas principalmente à natureza dos dados utilizados e às simplificações inerentes aos métodos de dimensionamento empregados. A análise foi conduzida com base em dados secundários provenientes da literatura técnica, de manuais normativos e de bases institucionais, não tendo sido realizados ensaios geotécnicos ou levantamentos estruturais *in situ* no trecho analisado. Essa condição restringe a validação empírica direta dos parâmetros adotados, especialmente no que se refere às propriedades mecânicas do subleito e das camadas estruturais do pavimento.

Adicionalmente, tanto o método mecanístico-empírico quanto o método empírico tradicional operam a partir de modelos teóricos que representam o comportamento estrutural do pavimento por meio de hipóteses simplificadoras. Embora esses modelos sejam amplamente consolidados e aceitos na prática da engenharia rodoviária, eles não são capazes de reproduzir integralmente a variabilidade espacial dos materiais, as condições reais de drenagem, os efeitos de execução e as interações complexas entre tráfego, clima e estrutura ao longo do tempo. A adoção de valores médios de CBR, coeficientes estruturais e parâmetros de tráfego implica, portanto, uma idealização controlada das condições reais do trecho estudado.

Cabe destacar, ainda, que o emprego do número de solicitações acumuladas (N) como parâmetro central de comparação entre os métodos, embora tecnicamente justificado e coerente do ponto de vista metodológico, não substitui análises estruturais baseadas em monitoramento de desempenho ao longo da vida útil do pavimento. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser interpretados como estimativas técnicas fundamentadas, adequadas para análises comparativas e para avaliação de viabilidade estrutural, mas não como substitutos de projetos executivos baseados em investigações de campo detalhadas.

Assim, as limitações identificadas não comprometem a coerência interna do estudo nem invalidam os resultados alcançados, mas delimitam seu alcance interpretativo. Os achados devem ser compreendidos no contexto de uma análise técnico-comparativa baseada em parâmetros normativos e dados secundários, sendo recomendável que investigações futuras incorporem

ensaios geotécnicos, avaliações deflectométricas e monitoramento em campo, de modo a refinar os parâmetros adotados e ampliar a precisão das análises estruturais aplicadas ao trecho Mariana–Ouro Preto.

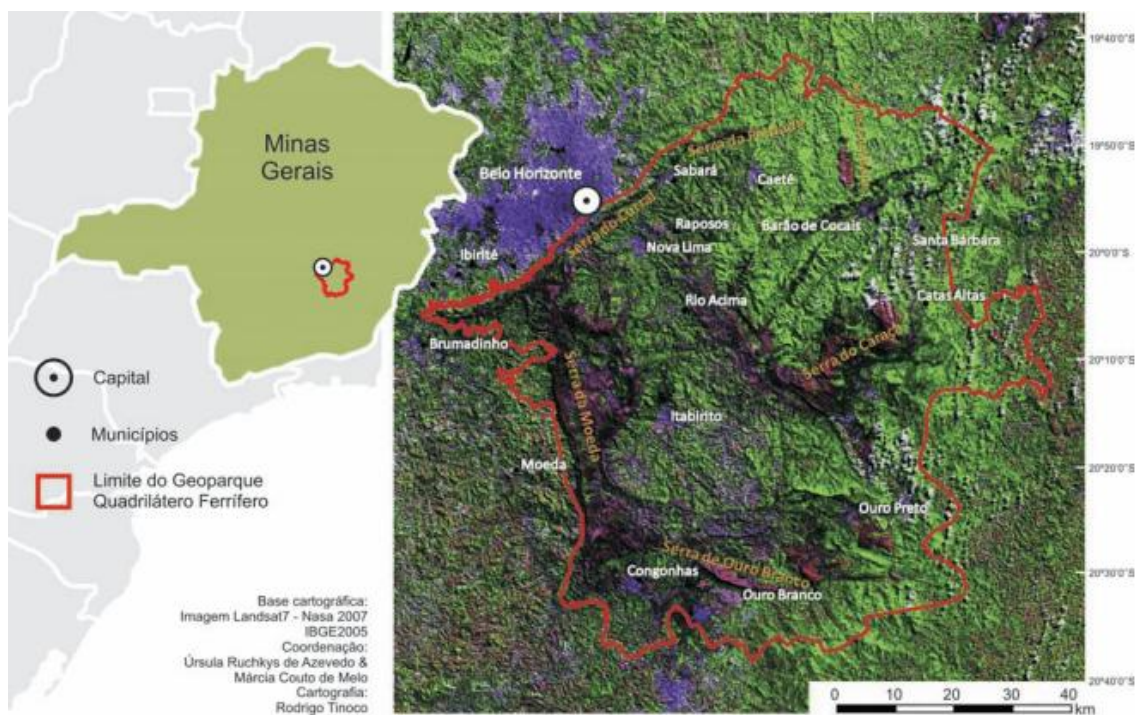
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta e discute os principais resultados obtidos a partir da análise técnica e da avaliação comparativa dos métodos de dimensionamento aplicados ao trecho rodoviário entre Mariana e Ouro Preto, buscando confirmar a viabilidade técnica do pavimento asfáltico, assim como evidenciar os ajustes estruturais necessários para garantir desempenho, durabilidade e eficiência adequados às condições operacionais exigentes da região.

4.1 CONDIÇÕES GEOGRÁFICAS E OPERACIONAIS DO TRECHO RODOVIÁRIO MARIANA–OURO PRETO

A região insere-se no contexto do Quadrilátero Ferrífero (Figura 5), uma das estruturas geológicas mais antigas e importantes do território brasileiro, formada por rochas do Pré-Cambriano com significativa presença de minério de ferro, ouro e outros metais. Essa unidade se caracteriza por uma topografia irregular, marcada pela alternância de cristas serranas, áreas deprimidas e colinas em diferentes níveis altimétricos.

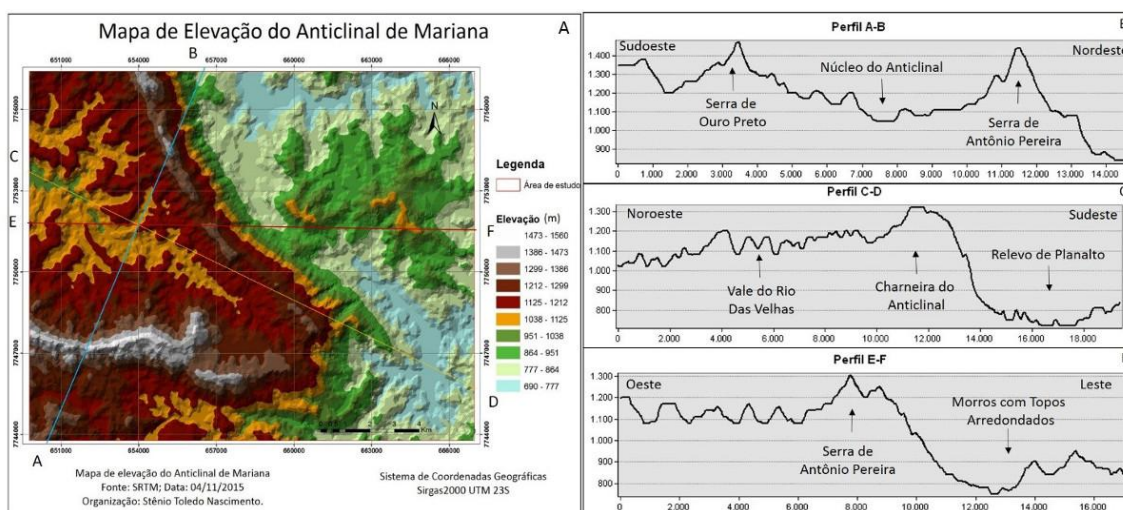
Figura 5 – Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Reis (2020).

As altitudes variam aproximadamente entre 700 e 1.250 metros ao longo do trecho analisado (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), o que confere ao relevo uma morfologia ondulada com fortes desníveis locais. Essa variação topográfica reflete-se na própria BR-356, que apresenta curvas acentuadas, rampas e cortes na encosta, exigindo intervenções de engenharia que considerem tanto a adaptação ao terreno quanto a preservação ambiental.

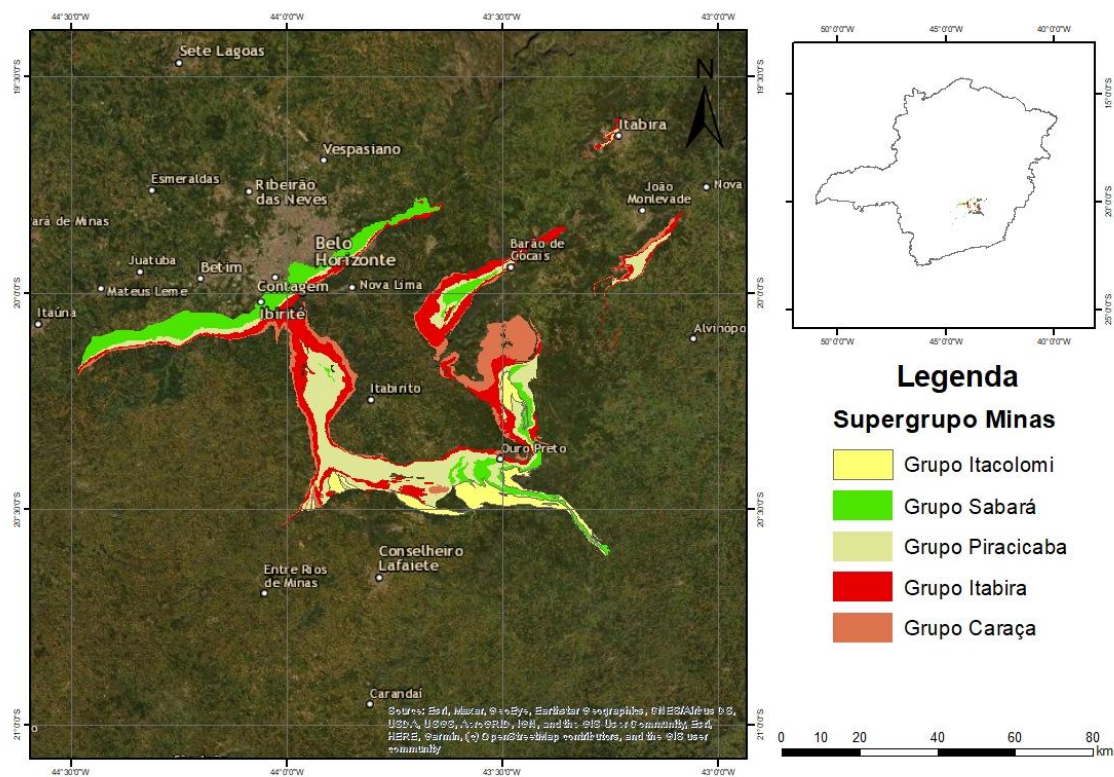
Figura 6 - Mapa de elevação do anticlinal de Mariana.



Fonte: Nascimento e Castro (2016).

A geologia da área é composta predominantemente por formações do Supergrupo Minas, conforme identificado em mapeamentos geológicos disponíveis (Figura 7). As formações rochosas da região são representadas por quartzitos, filitos, itabiritos, xistos e formações ferríferas bandadas, materiais que conferem à região uma identidade geológica única. A presença de estruturas como falhas geológicas e dobras também afeta a estabilidade do solo e a percolação da água, o que deve ser cuidadosamente considerado na gestão rodoviária, sobretudo durante períodos de chuvas intensas.

Figura 7 – Supergrupo Minas.



Fonte: Vianna (2022).

Do ponto de vista climático, a região está inserida em um regime tropical de altitude, com duas estações bem definidas: uma chuvosa no verão e outra seca no inverno. As chuvas concentradas no período de dezembro a março intensificam os riscos de instabilidade geotécnica, especialmente em encostas não vegetadas ou mal manejadas (Figura 8). A associação entre clima, relevo acidentado e cobertura superficial propicia a ocorrência de movimentos de massa e processos erosivos, exigindo intervenções preventivas que levem em conta as vulnerabilidades naturais da paisagem.

Figura 8 - Processo erosivo no trecho Mariana-Ouro Preto.



Fonte: Jornal Voz Ativa (2022).

No que diz respeito ao tráfego, faz-se necessário primeiramente compreender as classes dos veículos que circulam no trecho em questão. A classificação veicular adotada pela Pesquisa Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT), conforme documento oficial emitido pelo DNIT, organiza os diferentes tipos de veículos que circulam nas rodovias brasileiras com base na quantidade de eixos e no tipo de silhueta apresentada. Ao todo, o modelo divide os veículos em onze classes, com especificações detalhadas quanto à composição estrutural de cada tipo de veículo (Quadro 4). Essas características geomorfológicas e climáticas são apresentadas aqui por influenciarem diretamente as hipóteses de projeto adotadas no dimensionamento, especialmente no que se refere às condições de drenagem, à estabilidade do subleito e ao nível de solicitação imposto por tráfego em rampas e curvas.

Quadro 4 – Classificação veicular adotada pela PNCT

Classe	Quant. de Eixos	Composição
A	2	Ônibus e caminhões simples
B	3	Ônibus, caminhões simples e semirreboques
C	4	Caminhões simples mais semirreboques, caminhões mais reboques e caminhões mais dois semirreboques
D	5	Caminhões mais semirreboque, caminhões mais reboque, caminhões mais semirreboque e reboque, caminhões mais dois semirreboques
E	6	Caminhões mais semirreboque, caminhões mais reboque, caminhões mais semirreboque e reboque, caminhões mais dois semirreboques
F	7	Caminhões mais dois semirreboques, caminhões mais reboque, caminhões mais semirreboque e reboque, caminhões mais dois semirreboques
G	8	Caminhões mais dois semirreboques, caminhões mais semirreboque e reboque, caminhões mais dois reboques
H	9	Caminhões mais dois semirreboques, caminhões mais semirreboque e reboque, caminhões mais três semirreboques
I	2	Veículos de passeio e utilitários (categoria leve)
J	2 (rodas)	Motocicletas
L	Indefinido	Veículos não identificados ou não classificados

Fonte: Adaptado de DNIT (2022).

A partir desse entendimento, tem-se que a contagem de tráfego veicular, realizada no ponto de coleta analisado, totalizou 9.968 veículos, categorizados conforme o tipo e respectiva participação percentual sobre o volume total (Quadro 5). Ressalta-se que o valor apresentado corresponde ao volume observado no ponto de coleta considerado na PNCT/DNIT, utilizado neste estudo como aproximação do volume médio diário para fins de dimensionamento, conforme diretrizes do Manual de Estudos de Tráfego que utiliza como cálculo uma média simples do volume diário, com mínimo de 7 dias de coleta, e realizando tratamento de dados para eliminação de distorções (DNIT, 2022).

Quadro 5 – Tráfego veicular do trecho Mariana – Ouro Preto

Tipo	Volume	% do Tráfego Total
Motocicletas	792	7,94%
Veículos de passeio e utilitários	7.468	74,92%
Ônibus e caminhão simples (2 eixos)	1.193	11,97%
Ônibus, caminhão simples (3 eixos)	233	2,34%
Caminhão simples, caminhão + reboque e caminhão + semirreboque (4 eixos)	44	0,44%
Caminhão + semirreboque, caminhão + reboque, caminhão + 2 semirreboques (5 eixos)	71	0,71%
Caminhão + semirreboque, caminhão + reboque, caminhão + 2 semirreboques (6 eixos)	159	1,59%
Caminhão + reboque, caminhão + semirreboque, caminhão + 2 reboques e caminhão + 2 semirreboques (7 eixos)	6	0,06%
Caminhão + 2 semirreboques, caminhão + reboque e caminhão + 2 reboques (8 eixos)	0	0,00%
Caminhão + 2 semirreboques, caminhão + reboque e caminhão + 3 semirreboques (9 eixos)	2	0,02%
Total	9.968	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como observado, o maior contingente foi composto por veículos de passeio e utilitários, que somaram 7.468 unidades, representando expressivos 74,92% do total observado. Em seguida, destacaram-se os ônibus e caminhões simples (com dois eixos), os quais totalizaram 1.193 unidades, correspondendo a 11,97% do tráfego.

As motocicletas apresentaram um volume de 792 unidades, equivalentes a 7,94% do tráfego total, ocupando a terceira posição em termos de frequência. Já as combinações mais complexas de veículos de carga, como caminhão simples, caminhão com reboque e caminhão com semirreboque, apresentaram variações expressivas nos percentuais, refletindo a diversidade de configurações veiculares que transitam pelo trecho.

Por exemplo, veículos com quatro eixos, como caminhão simples acoplado a reboque ou semirreboque, foram registrados em número reduzido (44 veículos), correspondendo a 0,44% do tráfego. As combinações com cinco eixos somaram 71 unidades, representando 0,71% do total. Configurações com seis eixos, por sua vez, contabilizaram 159 unidades (1,59%). Os veículos com sete eixos apareceram em menor proporção, totalizando apenas 6 unidades (0,06%).

Já as composições mais robustas, com oito e nove eixos, foram praticamente insignificantes em termos quantitativos, com 0 e 2 registros respectivamente, o que equivale a 0,00% e 0,02% do tráfego geral. Essa distribuição evidencia a predominância de veículos leves no tráfego da região analisada, com participação marginal de veículos pesados e de múltiplos eixos.

Finalmente, vale destacar que a configuração predominante da BR-356 nesse segmento é de pista simples com apenas uma faixa por sentido (Quadro 6).

Quadro 6 – Configuração da BR-356 no trecho Mariana – Ouro Preto.

Número de faixas de tráfego da rodovia	Percentual de veículos comerciais na faixa de projeto (c)
2 (pista simples)	50%
4 (pista dupla)	35 a 48%
6 ou mais (pista dupla)	25 a 48%

Fonte: DNIT (2022).

Essa configuração de pista impõe severas restrições ao escoamento de tráfego e à realização de ultrapassagens seguras, sobretudo diante da expressiva participação de ônibus e veículos de carga. A ausência de terceiras faixas em trechos críticos e a inexistência de acostamentos largos agravam a condição de risco em curvas e aclives. Conforme parâmetros estabelecidos pelo próprio DNIT para análise de tráfego rodoviário, em trechos de pista simples com elevado percentual de veículos comerciais, como o identificado na BR-356, o impacto sobre o nível de serviço, desgaste do pavimento e segurança é significativamente ampliado. Estimativas do DNIT indicam que em rodovias com duas faixas, o percentual de veículos comerciais pode chegar a até 50%, sendo que a proporção observada nesse trecho se aproxima desses limites superiores, embora ainda abaixo do teto, o que evidencia sua criticidade operacional.

4.2 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO PARA DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO ASFÁLTICO DO TRECHO ESTUDADO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação de dois métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos ao trecho em estudo: o método mecanístico-empírico *MeDiNa – National Pavement Design Method* e o método empírico do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). São expostas, de forma sistematizada, as estruturas dimensionadas

por cada método, contemplando as espessuras de camadas e demais informações necessárias à compreensão das soluções obtidas. Destaca-se que os parâmetros de entrada utilizados no dimensionamento foram previamente descritos no capítulo de metodologia, enquanto a interpretação crítica e a discussão técnica comparativa dos resultados apresentados são desenvolvidas no capítulo subsequente.

4.2.1 *MeDiNa – National Pavement Design Method*

Para avaliar a viabilidade técnica da aplicação de pavimento asfáltico no trecho da rodovia BR-356 entre os municípios de Mariana e Ouro Preto, foi empregado o *software MeDiNa – National Pavement Design Method* (DNIT, 2023), ferramenta oficial do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) que permite o dimensionamento de pavimentos com base em métodos mecanístico-empíricos. O processo de análise foi dividido em três grandes etapas: alimentação dos dados de tráfego, inserção das características das camadas estruturais e verificação da resposta mecânica do sistema proposto.

Inicialmente, foi realizada a configuração do modelo de tráfego. O *software* requer informações essenciais para simular as solicitações estruturais ao longo da vida útil do projeto (Figuras 9 e 10, sendo a Figura 10 complemento da Figura 9).

Figura 9 – MeDiNa – Cálculo do Fator de Veículo.

MeDiNa - v.1.1.9.0 - abr/2023

MeDiNa - Cálculo do Fator de Veículo (DNIT)

Eixo Simples
 Dois eixos simples (direcional)
 Eixo simples de roda dupla
 Dois eixos duplos
 Dois eixos duplos em tandem
 Três eixos duplos em tandem
 Eixo especial

Inserir >>

<<<< << Remover

F.V. (DNIT) = 1,537

EIXO	CONFIGURAÇÃO	RODAS	FATOR DE EIXO (%) (1º Ano)	CARGA (ton)	FATOR DE CARGA (FC)	FATOR DE VEÍCULO (FV)
1	Eixo Simples	2	7,9	6,00	0,278	0,022
2	Eixo Simples	2	74,9	6,00	0,278	0,208
3	Eixo Simples	2	74,9	6,00	0,278	0,208
4	Eixo Simples	2	12,0	6,00	0,278	0,033
5	Eixo simples de roda dupla	4	12,0	10,00	3,289	0,395
6	Eixo Simples	2	2,3	6,00	0,278	0,006
7	Dois eixos duplos em tandem	8	2,3	17,00	8,549	0,197
8	Eixo Simples	2	0,4	6,00	0,278	0,001
9	Três eixos duplos em tandem	12	0,4	25,50	9,300	0,037
10	Eixo Simples	2	0,7	6,00	0,278	0,002
11	Dois eixos duplos em tandem	8	0,7	17,00	8,549	0,060
12	Dois eixos duplos em tandem	8	0,7	17,00	8,549	0,060
13	Eixo Simples	2	1,6	6,00	0,278	0,004
14	Dois eixos duplos em tandem	8	1,6	17,00	8,549	0,137
15	Três eixos duplos em tandem	12	1,6	25,50	9,300	0,149
16	Eixo Simples	2	0,1	6,00	0,278	0,000
17	Três eixos duplos em tandem	12	0,1	25,50	9,300	0,009
18	Três eixos duplos em tandem	12	0,1	25,50	9,300	0,009
19	Eixo Simples	2	0,0	6,00	0,278	0,000
20	Dois eixos duplos em tandem	8	0,0	17,00	8,549	0,000
21	Dois eixos duplos em tandem	8	0,0	17,00	8,549	0,000
22	Três eixos duplos em tandem	12	0,0	25,50	9,300	0,000
23	Eixo Simples	2	0,0	6,00	0,278	0,000

Sair Transportar

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - MeDiNa – Cálculo do Fator de Veículo.

MeDiNa - v.1.1.9.0 - abr/2023

MeDiNa - Cálculo do Fator de Veículo (DNIT)

EXO	CONFIGURAÇÃO	RODAS	FATOR DE EXO (%) (1º Ano)	CARGA (ton)	FATOR DE CARGA (FC)	FATOR DE VEÍCULO (FV)
8	Eixo Simples	2	0,4	6,00	0,278	0,001
9	Três eixos duplos em tandem	12	0,4	25,50	9,300	0,037
10	Eixo Simples	2	0,7	6,00	0,278	0,002
11	Dois eixos duplos em tandem	8	0,7	17,00	8,549	0,060
12	Dois eixos duplos em tandem	8	0,7	17,00	8,549	0,060
13	Eixo Simples	2	1,6	6,00	0,278	0,004
14	Dois eixos duplos em tandem	8	1,6	17,00	8,549	0,137
15	Três eixos duplos em tandem	12	1,6	25,50	9,300	0,149
16	Eixo Simples	2	0,1	6,00	0,278	0,000
17	Três eixos duplos em tandem	12	0,1	25,50	9,300	0,009
18	Três eixos duplos em tandem	12	0,1	25,50	9,300	0,009
19	Eixo Simples	2	0,0	6,00	0,278	0,000
20	Dois eixos duplos em tandem	8	0,0	17,00	8,549	0,000
21	Dois eixos duplos em tandem	8	0,0	17,00	8,549	0,000
22	Três eixos duplos em tandem	12	0,0	25,50	9,300	0,000
23	Eixo Simples	2	0,0	6,00	0,278	0,000
24	Dois eixos duplos em tandem	8	0,0	17,00	8,549	0,000
25	Três eixos duplos em tandem	12	0,0	25,50	9,300	0,000
26	Três eixos duplos em tandem	12	0,0	25,50	9,300	0,000

F.V. (DNIT) = 1,537

Sair Transportar

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo, foram utilizados os seguintes parâmetros: Volume Médio Diário de Tráfego (VMD) igual a 9.968 veículos/dia, fator de veículo (FV) de 1,537, taxa de crescimento anual de 3,0% e vida útil de projeto estimada em 20 anos. Considerando que a rodovia possui duas faixas de tráfego (pista simples), adotou-se o percentual de 50% de veículos comerciais na faixa de projeto, conforme diretrizes do DNIT (2022). Com esses dados, o *software* calculou um N total acumulado de solicitações ao pavimento de $7,51 \times 10^7$ (Figura 11).

Figura 11 – MeDiNa – Dados do tráfego.

+ EIXO PADRÃO RODoviÁRIO	
- DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	9968
FV:	1,537 ...
N anual (1º ano):	5,59e+06
% Veículos na faixa de projeto:	50
N Anual da faixa:	2,80e+06
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	20
N Total:	7,51e+07

Fonte: Elaborado pelo autor

A etapa seguinte consistiu na definição da estrutura preliminar do pavimento. Foram introduzidas as camadas padrão sugeridas pelo próprio MeDiNa, compostas por: (i) revestimento asfáltico com 10 cm de espessura, utilizando concreto asfáltico do tipo CBUQ (RJ CAP 30/45 com agregado 12,5 mm), (ii) base granular de brita graduada com 20 cm, (iii) sub-base composta por solo argiloso com 20 cm, e (iv) subleito com solo siltoso. Para cada camada, foram atribuídos os respectivos valores de módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (μ), conforme parâmetros padrão do DNIT (Figura 12).

Figura 12 – Definição da estrutura preliminar do pavimento.

MeDiNa - v.1.1.9.0 - abr/2023

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: vinicius EMPRESA: UFOP

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	9968
FV:	1,537
N anual (1º ano):	5.59e+06
% Veículos na faixa de projeto:	50
N Anual da faixa:	2.80e+06
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	20
N Total:	7.51e+07

FV:
Fator de veículo no ano de abertura do tráfego

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Elaborado pelo autor

Com essa configuração inicial, foi executada a análise estrutural da seção. Os resultados indicaram um nível de trincamento de 99% ao fim da vida útil, valor que excede significativamente o limite máximo admissível, comprometendo a funcionalidade da rodovia. Essa resposta evidencia que a estrutura projetada com apenas uma camada de revestimento asfáltico de 10 cm não é suficiente para suportar o nível de solicitações mecânicas impostas pelo tráfego projetado no trecho em questão (Figura 13).

Figura 13 – Análise estrutural do pavimento.

MeDiNa - v.1.1.9.0 - abr/2023

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: vinicius EMPRESA: UFOP

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	9968
FV:	1,537
N anual (1º ano):	5,59e+06
% Veículos na faixa de projeto:	50
N Anual da faixa:	2,80e+06
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	20
N Total:	7,51e+07

N Total:
Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---
Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 95%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%
Fundamento de Trilha de Roda: 5,9mm

--- ALERTAS ---
Tráfego elevado para a estrutura proposta.

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, avaliou-se a alternativa de aumento da espessura do revestimento asfáltico em camada única. O *software* indicou 15 cm como espessura-limite para o material selecionado, porém sinalizou que, mesmo com esse aumento, a estrutura não atenderia aos critérios de desempenho estabelecidos para o tráfego de projeto. (Figura 14).

Figura 14 – Alerta do sistema.

MeDiNa - v.1.1.9.0 - abr/2023

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: vinicius EMPRESA: UFOP

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	15,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO		189		0,45

MeDiNa

A espessura da camada selecionada atingiu o limite superior previsto!
Reveja a estrutura.

OK

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Principal

VMD (1º ano): 9968

FV: 1,537

N anual (1º ano): 5,59e+06

% Veículos na faixa de projeto: 50

N Anual da faixa: 2,80e+06

Taxa de crescimento (%): 3,0

Período de projeto (anos): 20

N Total: 7,51e+07

FV:
Fator de veículo no ano de abertura do tráfego

C:\Users\Usuario\Documents\tcc.pvt NÍVEL <A>

Fonte:

Elaborado pelo autor

Diante dessa limitação, a solução adotada foi a inclusão de uma segunda camada de revestimento asfáltico, para que o *software* consiga dimensionar, somando as duas camadas, uma espessura que suporte a solicitação da estrutura. A estrutura teve como resultado apresentado a primeira camada de concreto asfáltico de 10,0 cm e a segunda de 11,9 cm, totalizando 21,9 cm de concreto asfáltico na estrutura do pavimento. A base e a sub-base mantiveram-se com os mesmos materiais e espessuras (Figura 15).

Figura 15 – Dimensionamento do pavimento.

MeDiNa - v.1.1.9.0 - abr/2023

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: vinicius EMPRESA: UFOP

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
1	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
>> 2 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	11,9	9000	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaiss C5	20,0	381	0,35
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	9968
FV:	1.537
N anual (1º ano):	5.59e+06
% Veículos na faixa de projeto:	50
N Anual da faixa:	2.80e+06
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	20
N Total:	7.51e+07

--- DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO NOVO ---

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 95%

Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 28,0%

Afundamento de Trilha de Roda: 2,1mm

Os resultados obtidos pelo programa devem ser avaliados criteriosamente antes de serem aprovados para a execução de campo.

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao executar a análise final com a estrutura otimizada, os resultados indicaram 28% de área trincada ao fim do período de projeto, valor considerado aceitável segundo os critérios de desempenho mínimo estabelecidos pelo DNIT (2022). Neste estudo, adotou-se como referência o limite de área trincada estabelecido nos critérios de desempenho do DNIT aplicáveis ao MeDiNa, de modo que o resultado permaneceu dentro do patamar máximo admitido para o horizonte de 20 anos. Além disso, o afundamento da trilha de roda foi de 2,1 mm, e o índice de confiabilidade da análise atingiu 95%, demonstrando adequação da estrutura projetada frente às solicitações projetadas.

4.2.2 Método empírico do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER)

A aplicação do método empírico proposto pelo antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) foi empregada como alternativa de verificação estrutural ao modelo

mecanístico-empírico já desenvolvido. Esse método, ainda amplamente referenciado no meio técnico, baseia-se na correlação entre o número de solicitações equivalentes de eixo padrão (N), o suporte do subleito (expressado em termos de CBR), e as espessuras mínimas das camadas que compõem o pavimento. A sequência de procedimentos foi conduzida de maneira a garantir rigor técnico e aderência às diretrizes clássicas de dimensionamento rodoviário.

Conforme demonstrado no Quadro 1, foram adotados critérios de qualidade dos materiais de acordo com o valor de CBR e o limite de expansão volumétrica permitido. Assim, o material de subleito exigiu um CBR $\geq 2\%$, com expansão inferior a 2%; o reforço do subleito deveria possuir CBR superior ao do subleito, com expansão inferior a 1%, sendo adotado CBR de 12%; a sub-base foi considerada com CBR $\geq 20\%$, expansão $< 1\%$; e a base com CBR $\geq 80\%$ e expansão $< 0,5\%$.

A partir do número total de solicitações de eixo padrão de 8,2 toneladas (N), calculado previamente via MeDiNa como $7,51 \times 10^7$, foi utilizado o ábaco (Figura 3) para estimar os valores de espessuras das camadas H_m , H_n e H_{20} . Com base na curva referente ao CBR do subleito (2%) e no número de solicitações, chegou-se a uma espessura total H_m de 121 cm. Da mesma forma, com base na curva referente ao CBR do reforço do subleito (12%) e no número de solicitações, teve como resultado a espessura H_n de 42 cm. E, por último a camada H_{20} , utilizando o CBR da sub-base (20%) e o número de solicitações, o ábaco retornou a espessura de 29 cm.

Dado que o número de solicitações N é superior a 5×10^7 , a tabela de referência apresentada no Quadro 2 indicou a necessidade de um revestimento betuminoso com espessura mínima de 12,5 cm. Esse valor corresponde à faixa mais exigente de tráfego, o que reforça a robustez estrutural demandada para o trecho em estudo.

Para calcular as espessuras das demais camadas (base, sub-base e reforço do subleito), utilizaram-se os coeficientes de equivalência estrutural (K), dispostos no Quadro 3.

Conforme explicado na metodologia, foram adotados os seguintes valores:

- **$K_r = 2,0$** para o revestimento (concreto asfáltico),
- **$K_b = 1,0$** para a base (camada granular),
- **$K_s = 1,0$** para a sub-base (também camada granular),
- **$K_n = 1,0$** para o reforço do subleito.

Esses valores permitiram a aplicação das inequações padronizadas de dimensionamento, garantindo que a contribuição estrutural das camadas seja devidamente ponderada.

- $R \times K_r + B \times K_b \geq H_{20}$
- $R \times K_r + B \times K_b + h_{20} \times K_s \geq H_n$
- $R \times K_r + B \times K_b + h_{20} \times K_s + h_n \times K_n \geq H_m$

Em que:

- R , B , h_{20} e h_n são os valores das espessuras das camadas de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito respectivamente;
- H_{20} , H_n e H_m são os valores das camadas equivalentes.

A partir dessas inequações, foram definidas as espessuras mínimas necessárias para cada camada do sistema, respeitando as exigências normativas e garantindo a equivalência funcional com os critérios estabelecidos no método mecanístico-empírico anteriormente descrito.

$$R \times K_r + B \times K_b \geq H_{20}$$

$$12,5 \times 2 + B \times 1 \geq 29 \times 1,2$$

$$B \geq 29 \times 1,2 - 12,5 \times 2 = 9,8 \text{ cm}$$

A espessura mínima construtiva para camadas granulares é de 15 cm (DNIT, 2010). Adota-se então, para a camada de base 15 cm ($B = 15 \text{ cm}$).

$$R \times K_r + B \times K_b + h_{20} \times K_s \geq H_n$$

$$12,5 \times 2 + 15 \times 1 + h_{20} \times 1 \geq 42$$

$$H_{20} \geq 42 - 12,5 \times 2 - 15 \times 1 = 2 \text{ cm}$$

Seguindo a mesma regra da camada de base, adota-se a espessura de 15 cm para a sub-base ($H_{20} = 15 \text{ cm}$).

$$R \times K_r + B \times K_b + h_{20} \times K_s + h_n \times K_n \geq H_m$$

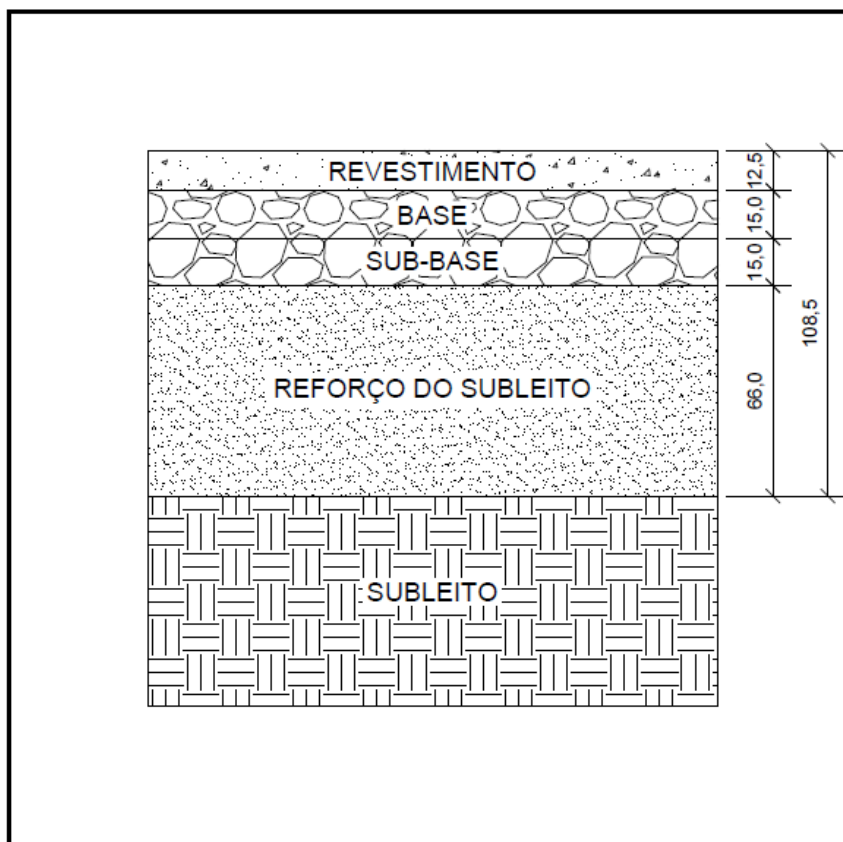
$$12,5 \times 2 + 15 \times 1 + 15 \times 1 + h_n \times 1 \geq 121$$

$$H_n \geq 121 - 12,5 \times 2 - 15 \times 1 - 15 \times 1 = 66 \text{ cm}$$

$$H_n = 66 \text{ cm}$$

A partir desses resultados, obteve-se uma estrutura com revestimento betuminoso de 12,5 cm, base granular de 15 cm, sub-base granular de 15 cm e reforço do subleito de 66 cm, totalizando 108,5 cm de espessura (Figura 16).

Figura 16 – Estrutura do pavimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO NO TRECHO

A análise comparativa realizada por meio da aplicação dos métodos MeDiNa e DNER confirma a viabilidade técnica da adoção de pavimento asfáltico para o trecho rodoviário estudado, desde que sejam adotadas espessuras estruturais compatíveis com as condições de tráfego e suporte do subleito. O método mecanístico-empírico MeDiNa indicou a necessidade de uma estrutura composta por 21,9 cm de revestimento asfáltico, associada a camadas granulares convencionais de base e sub-base, apresentando desempenho satisfatório quanto aos critérios de trincamento, afundamento em trilha de roda e confiabilidade estrutural ao longo da vida útil de projeto.

De forma complementar, o método empírico DNER também confirmou a viabilidade estrutural do pavimento flexível, embora tenha indicado a necessidade de uma espessura total significativamente superior, com destaque para a elevada contribuição do reforço do subleito, resultando em uma estrutura total de 108,5 cm. Esses resultados demonstram que, sob diferentes abordagens metodológicas, o pavimento asfáltico apresenta capacidade de atender às solicitações mecânicas previstas para o trecho, desde que devidamente dimensionado.

A divergência observada entre as espessuras resultantes dos dois métodos está diretamente relacionada às diferenças conceituais e aos parâmetros de entrada utilizados em cada abordagem. O método DNER, de natureza empírica, baseia-se em correlações derivadas de observações experimentais históricas e apresenta elevada sensibilidade ao valor do CBR do subleito. No presente estudo, a adoção de um CBR de 2% resultou na necessidade de espessas camadas de reforço estrutural, refletindo o caráter conservador do método quando aplicado a subleitos de baixa capacidade de suporte.

Por outro lado, o método MeDiNa, fundamentado em princípios mecanístico-empíricos, considera explicitamente os parâmetros mecânicos dos materiais, as condições reais de carregamento e a resposta estrutural do sistema ao longo do tempo, permitindo uma estimativa mais refinada da espessura necessária com base em critérios de desempenho, como trincamento por fadiga e deformação permanente (DNIT, 2022; DNIT, 2023). Segundo Bernucci *et al.* (2008), métodos mecanístico-empíricos tendem a fornecer dimensionamentos mais representativos do comportamento real do pavimento, uma vez que incorporam propriedades mecânicas dos materiais

e modelos de resposta estrutural, reduzindo o grau de conservadorismo inerente às abordagens puramente empíricas.

Ademais, a ausência de dados experimentais específicos do subleito e das camadas granulares, como ensaios de módulo resiliente e caracterização mecânica detalhada dos materiais locais, contribui para o aumento das incertezas associadas ao dimensionamento empírico, uma vez que este depende diretamente de parâmetros simplificados, como o CBR, que não representa integralmente o comportamento mecânico do solo sob carregamento repetido (Lopes e Motta, 2013). Dessa forma, as diferenças observadas entre os resultados não indicam inconsistência técnica, mas refletem as distintas premissas e níveis de refinamento associados a cada método, sendo o método DNER mais conservador e o método MeDiNa mais representativo do comportamento estrutural real do pavimento.

Como referência técnica complementar, pavimentos rígidos, constituídos por placas de concreto de cimento Portland, apresentam elevada rigidez estrutural e distinta forma de distribuição de tensões em comparação aos pavimentos flexíveis, transmitindo menores deformações às camadas inferiores (Bernucci *et al.*, 2008). No entanto, a escolha entre soluções flexíveis e rígidas depende de diversos fatores técnicos, incluindo características geotécnicas, condições de tráfego, disponibilidade de materiais e critérios de projeto adotados, não sendo objeto de dimensionamento específico no presente estudo.

Desta forma, os resultados obtidos confirmam que o pavimento asfáltico é tecnicamente viável para o trecho analisado, desde que dimensionado com base em critérios compatíveis com as condições locais de tráfego e suporte do subleito. A análise comparativa entre os métodos evidencia a importância da seleção criteriosa da metodologia de dimensionamento e da adequada caracterização dos materiais, uma vez que tais fatores exercem influência direta na definição da estrutura final do pavimento e no seu desempenho ao longo da vida útil de projeto.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS MEDINA E DNER

Com o objetivo de consolidar a análise estrutural e aprimorar a clareza interpretativa dos resultados obtidos, foi elaborada uma síntese comparativa entre os métodos mecanístico-empírico e empírico aplicados ao dimensionamento do pavimento asfáltico do trecho da BR-356, entre Mariana e Ouro Preto. O Quadro 7 apresenta de forma sistematizada os principais parâmetros técnicos, critérios de dimensionamento e resultados obtidos em cada abordagem.

Quadro 7 – Comparativo entre os métodos MeDiNa e DNER.

Parâmetro / Critério	Método MeDiNa (mecanístico-empírico)	Método DNER (empírico)
Base conceitual	Combina princípios mecânicos e empíricos, simulando o comportamento estrutural sob solicitações de tráfego e variações ambientais.	Fundamenta-se em correlações empíricas entre o número de repetições de carga (N), o CBR e a espessura mínima das camadas.
Vida útil de projeto	20 anos	20 anos
Número de solicitações acumuladas (N)	$7,51 \times 10^7$	$7,51 \times 10^7$ (mesmo valor de entrada)
Percentual de veículos comerciais na faixa de projeto	50%	50%
Camadas estruturais	Revestimento asfáltico de 21,9 cm (duas camadas: 10 cm + 11,9 cm), base granular de 20 cm, sub-base de 20 cm, subleito de solo siltico.	Revestimento asfáltico de 12,5 cm, base granular de 15 cm, sub-base de 15 cm, reforço de subleito de 66 cm.
Espessura total do pavimento	61,9 cm	108,5 cm
Critérios de desempenho	Confiabilidade: 95%; trincamento: 28% ao fim da vida útil; afundamento de trilha de roda: 2,1 mm.	Critério de resistência global baseado em CBR e coeficientes de equivalência estrutural (K).
Tipo de avaliação estrutural	Simulação de tensões, deformações e fadiga cumulativa.	Análise empírica baseada em ábacos e inequações padronizadas.
Principais vantagens	Realismo na simulação do comportamento mecânico e consideração de variáveis ambientais.	Simplicidade de aplicação e baixo custo computacional.
Limitações	Exige base de dados detalhada e <i>software</i> específico; sensível à calibração dos parâmetros.	Não considera variações térmicas, fadiga ou deformação acumulada; pode superdimensionar estruturas.

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de DNIT (2006; 2023) e Gontijo (2021).

Os resultados evidenciam uma discrepância significativa entre os dois métodos, especialmente no que se refere à espessura total do pavimento: enquanto o MeDiNa indicou 61,9 cm, o DNER resultou em 108,5 cm, 75,3% maior. Essa diferença decorre do fato de o método empírico adotar coeficientes fixos e relações simplificadas entre carga e resistência, conduzindo a estruturas mais conservadoras. Já o modelo mecânico-empírico considera o comportamento real dos materiais sob carga repetida, o que permite otimizar a espessura sem comprometer o desempenho. Adicionalmente, o MeDiNa integra critérios de confiabilidade, trincamento e

deformação permanente, oferecendo um diagnóstico mais realista sobre a durabilidade do pavimento.

Em síntese, o método DNER tende a produzir soluções mais conservadoras por se basear em correlações globais e coeficientes fixos, enquanto o MeDiNa incorpora critérios de desempenho e simulação mecânica que permitem otimização de espessuras sem prescindir de verificações de trincamento e deformação permanente. Para o trecho analisado, marcado por tráfego elevado e condições de suporte desfavoráveis adotadas para o subleito, os resultados sugerem maior aderência do MeDiNa à lógica de verificação de desempenho, ao passo que o DNER oferece uma estimativa conservadora útil como referência de segurança.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo analisar a viabilidade técnica da aplicação do pavimento asfáltico no trecho rodoviário que interliga os municípios de Mariana e Ouro Preto, considerando suas condições geográficas, operacionais e estruturais específicas. A partir da aplicação comparativa dos métodos de dimensionamento empírico (DNER) e mecanístico-empírico (MeDiNa), foi possível avaliar o comportamento estrutural do pavimento frente às solicitações de tráfego previstas, bem como compreender as implicações técnicas associadas às diferentes abordagens de dimensionamento. A consistência dos resultados obtidos decorre da análise comparativa direta entre os dois métodos, o que permitiu identificar convergências quanto à viabilidade estrutural da solução asfáltica e divergências relacionadas às espessuras estruturais necessárias, decorrentes das distintas premissas conceituais e níveis de refinamento metodológico.

A caracterização do trecho evidenciou um cenário geotécnico e operacional complexo, marcado por relevo montanhoso, variações altimétricas significativas, elevada incidência de chuvas e presença de tráfego misto, incluindo veículos comerciais. Esses fatores exercem influência direta sobre o desempenho estrutural do pavimento, exigindo soluções dimensionadas com base em critérios técnicos compatíveis com as condições locais. Nesse contexto, os resultados obtidos indicaram que o pavimento asfáltico apresenta viabilidade técnica para aplicação no trecho estudado, desde que adotadas espessuras estruturais adequadas e respeitados os critérios de dimensionamento estabelecidos pelas metodologias analisadas.

A comparação entre os métodos demonstrou que o modelo mecanístico-empírico MeDiNa forneceu uma estimativa estrutural compatível com os critérios de desempenho definidos para o horizonte de projeto, ao considerar parâmetros relacionados ao comportamento mecânico dos materiais e à resposta estrutural do pavimento sob carregamento repetido. Por sua vez, o método empírico DNER indicou a necessidade de uma estrutura mais espessa, especialmente em função do baixo valor de CBR adotado para o subleito, refletindo o caráter conservador do método quando aplicado a condições geotécnicas menos favoráveis. Essa divergência não representa inconsistência técnica, mas sim a manifestação das diferentes premissas metodológicas e do nível de simplificação inerente às abordagens empíricas em comparação aos modelos mecanístico-empíricos.

Destaca-se, entretanto, que as conclusões apresentadas devem ser interpretadas à luz das limitações metodológicas deste estudo. A análise foi conduzida com base em dados secundários e

parâmetros representativos obtidos a partir de literatura técnica e bases institucionais, sem a realização de ensaios laboratoriais ou de campo específicos para caracterização mecânica dos materiais do subleito e das camadas granulares. A ausência de ensaios como módulo resiliente, deformação permanente e monitoramento estrutural *in situ* implica a adoção de hipóteses simplificadoras, que introduzem incertezas inerentes ao processo de dimensionamento. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser compreendidos como estimativas técnicas fundamentadas em modelos consolidados, mas condicionadas às premissas adotadas.

Nesse sentido, os resultados desta pesquisa contribuem para a compreensão do comportamento estrutural de pavimentos asfálticos em regiões de relevo acidentado e subleitos de baixa capacidade de suporte, evidenciando a importância da adequada seleção do método de dimensionamento e da caracterização técnica dos materiais envolvidos. Para o aprimoramento das análises, recomenda-se que estudos futuros incluam ensaios geotécnicos e mecânicos específicos dos materiais locais, bem como o monitoramento do desempenho estrutural do pavimento ao longo de sua vida útil, de modo a reduzir incertezas e ampliar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Sendo assim, conclui-se que o pavimento asfáltico constitui uma solução tecnicamente viável para o trecho rodoviário analisado, desde que seu dimensionamento seja conduzido com base em critérios técnicos compatíveis com as condições locais e considerando as limitações inerentes aos dados disponíveis. A abordagem comparativa entre os métodos DNER e MeDiNa mostrou-se fundamental para a compreensão das implicações estruturais associadas a diferentes metodologias de dimensionamento, contribuindo para o suporte técnico à tomada de decisão em projetos de pavimentação rodoviária.

REFERÊNCIAS

ABREU , H. I. de .; SANTOS, L. R. dos .; PIRES, R. C. S. . Um Estudo Sobre Manifestações Patológicas em Pavimentação Asfáltica . **Epitaya E-books**, [S. l.], v. 1, n. 32, p. 192-203, 2023. DOI: 10.47879/ed.ep.2023724p192. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/731>. Acesso em: 13 mar. 2026

AZEVEDO, R. H. S. **Avaliação dos riscos ambientais encontrados nas obras de pavimentação asfáltica**. Palmas: Centro Universitário Luterano de Palmas, 2019.

BALBO, J. T.; Dornelas, R.C. **Custos de reciclagem de pavimentos de concreto e seu potencial econômico na realidade brasileira**. Transportes, v. 23, n. 2, p. 75–84, 2015.

BALDUINO, Y. C. S.; Cosmo R.P. **Principais patologias na pavimentação rodoviária: identificação das causas e reparos**. Revista Espira Acadêmica Tecnológica, v. 7, n. 1, p. 13–18, 2022.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2008. 3. reimpressão, 2010.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação: execução, projeto e conservação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BORGES, W. S. A.; PEIXOTO, M. S. **Aspectos técnicos da pavimentação asfáltica: processos, materiais e controle de qualidade**. Revista Foco, v. 17, n. 4, p. 188–199, nov./dez. 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n4.188. Disponível em: <https://revistafoco.com.br/index.php/foco/article/view/188>. Acesso em: 31 out. 2025.

CARVALHO, M. D. **Pavimento de concreto: reduzindo o custo social**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, mar. 2007.

CAVALET, V. C. *et al.* **Análise comparativa do custo-benefício entre pavimentos flexíveis em concreto asfáltico e pavimentos rígidos em concreto de cimento Portland aplicado em rodovia**

de alto tráfego. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú-SC, 10-14 nov. 2019.

CAVALET, V. N. *et al.* **Análise comparativa do custo-benefício entre pavimentos flexíveis em concreto asfáltico e pavimentos rígidos em concreto de cimento Portland aplicado em rodovia de alto tráfego.** 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú - SC, 10 a 14 nov. 2019.

CERVO, T. C. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2004.

CIPRIANO, L. F.; LIMA, R. C. S.; SILVESTRE, K. C. C. **Estudo comparativo de pavimento rígido e pavimento flexível através da análise de solo na PB 008.** Acta Scientia – Revista Acta Scientia, v. 3, n. 1, p. 28–40, jul./dez. 2021. ISSN 2596-2078. Disponível em: <https://revistaactascientia.com.br/index.php/actascientia/article/view/1399>. Acesso em: 31 out. 2025.

COSTA, W. B. *et al.* **Patologias de pavimento flexível: contração da capa asfáltica devido a baixa temperaturas e endurecimento do asfalto.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 11, p. 108278–108291, nov. 2021.

CRESWELL, John W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto.** 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (Brasil). **Caderno técnico: pavimentação.** Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO. Versão 1.1. Brasília: DNIT, jan. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pesquisa Nacional de Contagem de Tráfego – PNCT.** Brasília: DNIT, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit>. Acesso em: 26 mar. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** Publicação IPR-720. Brasília: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2010.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GONTIJO, Grasielle Martins. **Estudo do tráfego e da viabilidade de dimensionamento de um pavimento ideal para o Campus Morro do Cruzeiro/UFOP – Ouro Preto/MG**. 2021. 54 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

GOOGLE. **Google Maps**. 2025. Disponível em: <https://maps.google.com>. Acesso em: 26 nov. 2025.

HALLACK, A. **Competitividade do pavimento de concreto**. Seminário Pavimentos Urbanos, Concrete Show – São Paulo. Associação Brasileira de Cimento Portland, 2008.

JORNAL VOZ ATIVA. **Atualização sobre a BR-356 e outras vias próximas a Ouro Preto, Mariana, Ouro Branco e Itabirito – MG**. Voz Ativa, 12 jan. 2022. Disponível em: <https://jornalvozativa.com/urgente/atualizacao-br-356-outras-proximas-ouro-preto-mariana-ouro-branco-itabirito-mg/>. Acesso em: 26 mar. 2026.

KOSTULSKI, A. M. **Análise comparativa de custo entre pavimentos de concreto de cimento Portland, blocos intertravados e concreto asfáltico**. Alegrete: Universidade Federal do Pampa, 2015.

KRAU, M. M. T. *et al.* **Avaliação do ciclo de vida (ACV) na pavimentação asfáltica: uma revisão sistemática da literatura**. Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, p. 612, 2021.

LEAL, Natália Dias. **Caracterização e análise estrutural em testemunhos de sondagem do Corpo Laranjeiras, depósito aurífero do Córrego 54 – Sítio (Quadrilátero Ferrífero, MG)**. 2020. 54 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Geológica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

LOPES, M. F. G.; MOTTA, L. M. G. **Estrutura de pavimentos semirrígidos e o efeito da rigidez da base tratada com cimento: uma revisão crítica**. *Transportes*, v. 21, n. 1, p. 61–72, 2013.

MAIA, L. F. R. **Análise mecânica de um pavimento de concreto utilizando elementos finitos**. Guarapuava: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MARIN, V. J. F. G. *et al.* **Análise experimental de tensões em pavimento de concreto armado na rodovia BR-232/PE**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

MENDES, S. L.; ANJOS, L. R. **Comparação técnico-econômica entre pavimentos rígido e flexível para rodovias de alto volume de tráfego**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 2, n. 4, p. 154–172, 2018.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Mobilidade. **Lote 7: Ouro Preto – Mariana (Via Liberdade)**. Unidade PPP – Concessões e Parcerias. Disponível em: <https://www.ppp.mg.gov.br/projetos/contratos-assinados/lote-7-ouro-preto-mariana>. Acesso em: 26 nov. 2025.

MOTTA, L. M. G. *et al.* **Pavimentação Rodoviária: conceitos e evolução tecnológica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2021.

NASCIMENTO, S. T.; CASTRO, P. T. A. **Mapeamento geomorfológico do anticlinal de Mariana a partir do uso de imagens SRTM**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 11., 2016, Maringá. Anais [...]. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2016. Disponível em: <https://sinageo.org.br/2016/trabalhos/6/6-6-1477.html>. Acesso em: 26 mar. 2026.

OMIJA, F. T.; SILVA, L. R.; SANTOS, J. A. **Estudo do impacto ambiental do modal rodoviário brasileiro**. *EnGeTec – Encontro de Gestão e Tecnologia*, São Paulo: FATEC Zona Leste, v. 4, p. 1–12, nov. 2021. Disponível em: https://www.fateczl.edu.br/engeotec/2021/4_EnGeTec_paper_41.pdf. Acesso em: 31 out. 2025.

PINTO, I. S. **Pavimentação asfáltica: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

REIS, Fernando Mendes Palhares. **Quadrilátero ferrífero e comunidade**. Minera Jr., 19 ago. 2020. Disponível em: https://minerajr.ufop.br/blog.quadrilatero_ferifero_e_comunidade.html. Acesso em: 26 mar. 2025.

ROCHA, G. D. C. *et al.* **Análise dos pavimentos utilizados nas rodovias brasileiras**. Revista Mangaião Acadêmico, v. 1, n. 2, p. 50–65, 2022. ISSN 2358-3961. Disponível em: <https://revistamangaiaoacademico.com.br/index.php/revista/article/view/4art>. Acesso em: 31 out. 2025.

RODRIGUES, A. S. *et al.* **Efeitos da pavimentação asfáltica em comparação ao concreto quanto às ilhas de calor**. Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia, v. 1, p. 13, 2019.

SALAMÃO, P. E. A.; Froés L.M.M. **Pavimentação rodoviária: uma análise de qual melhor tipo de pavimentação para as rodovias brasileiras**. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v. 02, 2020/02.

SALOMÃO, Pedro Emílio Armador; FRÓES, Luann Marco Moreira. Pavimentação rodoviária: uma análise de qual melhor tipo de pavimentação para as rodovias brasileiras. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro – UNIPAC** ISSN, v. 2, p. 5, 2020.

SANTANA, C. S. A. *et al.* **Análise de emissões de gases de efeito estufa considerando o serviço de pavimentação em via urbana**. Revista Caderno Pedagógico – Studies Publications e Editora Lótus, v. 22, n. 3, p. 01-21, 2024.

SANTOS, C.M. **Pavimentação de estradas de mina: um estudo de caso do Complexo Mariana, VALE S.A.** 2021. 92 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

SEVERI, A. A. **Estudo dos gradientes térmicos em pavimentos de concreto de cimento Portland no ambiente tropical**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002.

SOUZA, R. F.; LOBO, C. A. **Pavimentos semirrígidos e sistemas híbridos: uma solução intermediária para o tráfego pesado em regiões montanhosas.** Revista Infraestrutura Rodoviária, v. 10, n. 2, p. 77–93, 2019.

TELES, A. A. *et al.* **Avaliação de ciclo de vida (ACV) e avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV) de pavimentos asfáltico e de concreto de cimento Portland por meio da quantificação do consumo energético e emissão de CO₂: análise comparativa.** 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR), Foz do Iguaçu, 2023.

TELES, A. A. **Método para avaliação do ciclo de vida de serviços de infraestrutura de transportes a partir de dados do SICRO: análise comparativa entre pavimentos asfáltico e de concreto com monetização das emissões de carbono.** 2024. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

VENTURA, C. C. **Avaliação funcional do pavimento do Campus Morro do Cruzeiro por meio do método do Índice de Gravidade Global (IGG).** 2022. 56 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

VIANNA, T. **Mapa da localização dos grupos que compõem o Supergrupo Minas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Brasil.** 2022. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Supergrupo_Minis#/media/Ficheiro:Mapa_Supergrupo_Minis.jpg. Acessado em: 20 de fev. 2026.