

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANA BEATRIZ RAIMUNDO
ANDRE FILIMBERTI MOTTER**

**ANÁLISE DOS FATORES QUE AFETAM O DIMENSIONAMENTO DOS
PAVIMENTOS ENTRE OS MÉTODOS MEDINA E DNER/81**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANA BEATRIZ RAIMUNDO
ANDRE FILIMBERTI MOTTER**

**ANÁLISE DOS FATORES QUE AFETAM O DIMENSIONAMENTO DOS
PAVIMENTOS ENTRE OS MÉTODOS MEDINA E DNER/81**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador:
Prof. Fábio Krueger da Silva, Dr.

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelos autores

Motter, Andre
Raimundo, Ana Beatriz
ANÁLISE DOS FATORES QUE AFETAM O DIMENSIONAMENTO DOS
PAVIMENTOS ENTRE OS MÉTODOS MEDINA E
DNER/81 / Ana Beatriz Raimundo, Andre Motter ;
orientador, Fábio Krueger da Silva, 2025.
84 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto
Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Graduação
em Engenharia civil, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Dimensionamento de pavimentos.
3. Método DNER/81. 4. Método MeDiNa. 5. Pavimentos flexíveis.
I. Krueger da Silva, Fábio. II. Instituto Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia civil. IV. Título.
III. ANÁLISE DOS FATORES QUE AFETAM O DIMENSIONAMENTO DOS
PAVIMENTOS ENTRE OS MÉTODOS MEDINA E DNER/81

ANÁLISE DOS FATORES QUE AFETAM O DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS ENTRE OS MÉTODOS MEDINA E DNER/81

**ANA BEATRIZ RAIMUNDO
ANDRE FILIMBERTI MOTTER**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 24 de fevereiro de 2025.

Banca Examinadora:

Fábio Krueger da Silva, Dr.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Fernanda Simoni Schuch, Dra.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Johnny Gilberto Moraes Coelho, Dr.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Ramon Mendes Knabben, Dr.
Ktop Consultoria e Engenharia e Rodobot Tecnologia.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao nosso orientador, professor Fábio, pelo apoio, paciência e ensinamentos ao longo desta jornada. Sua orientação foi fundamental para que conseguíssemos desenvolver este trabalho com seriedade, dedicação e motivação. Obrigado por estar conosco nessa caminhada e por acreditar em nosso potencial.

Eu, Ana Beatriz, agradeço aos meus pais, Josiani e Huri Raimundo, que me inspiraram, apoiaram e incentivaram em todos os momentos. Obrigada pai, por estar presente nesta trajetória acadêmica, desde o dia da aprovação até na escrita deste trabalho. Sua presença, apoio e exemplo vão muito além da engenharia, você é minha inspiração. E a minha mãe, por ser minha maior parceira e incentivadora para todos os momentos. Como também aos meus irmãos, meu namorado e aos meus avós por estarem sempre presentes e me apoiarem ao longo da graduação.

Eu, André, gostaria de agradecer aos meus pais Marli e Valsir, por serem exemplo de superação; meus irmãos Adriana e Caetano, exemplos de integridade; minha esposa Cristiane, por todo o incentivo nessa jornada e à minha filha Romana que está chegando em nossas vidas. A todos eles, agradeço o imenso amor, e a Deus por estar comigo nos momentos mais difíceis.

Aos colegas de curso, que viveram conosco essa caminhada, com quem dividimos desafios e aprendizados. Sem vocês, essa experiência não seria a mesma.

Aos membros da banca, agradecemos a disponibilidade e contribuições no desenvolvimento deste trabalho. Suas observações e sugestões foram de extrema importância para o aprimoramento deste estudo.

E, por fim, ao IFSC, por nos proporcionar uma formação de qualidade e oportunidades de crescimento.

RESUMO

O Brasil, devido à sua vasta extensão territorial, depende de um eficaz sistema de transporte para seu desenvolvimento econômico. O modal rodoviário desempenha um papel crucial ao conectar regiões remotas, mas enfrenta desafios significativos relacionados à conservação das rodovias. A deterioração dos pavimentos, causada por fatores climáticos, tráfego intenso e deficiências na execução e manutenção, impacta diretamente os custos operacionais e a durabilidade das infraestruturas viárias. Nesse contexto, a necessidade de aprimoramento dos métodos de dimensionamento dos pavimentos torna-se evidente, especialmente diante do aumento do volume de tráfego e das cargas transportadas. No Brasil, os principais métodos utilizados são o DNER/81, de base empírica e focado na capacidade de suporte do solo, e o MeDiNa, que combina abordagens empíricas e mecânicas, permitindo uma análise mais detalhada das solicitações estruturais. Este trabalho tem como objetivo comparar a variação da espessura do revestimento obtida por esses dois métodos, considerando diferentes condições de tráfego, capacidade de suporte do subleito e tipos de revestimentos (Classe 1 e Classe 4). Além das diferenças conceituais entre as metodologias, visto que o MeDiNa exige um rigor maior na caracterização dos materiais e no processo de dimensionamento. Para objeto de análise, foram estabelecidos parâmetros comuns entre as duas metodologias, incluindo variações da solicitação de carga (N) e a correlação do CBR do subleito para o módulo de resiliência no MeDiNa. Ademais, foram analisadas as diferenças entre os tipos de revestimento adotados em cada método, uma vez que o MeDiNa considera o comportamento à fadiga do revestimento asfáltico com base em propriedades mecânicas dos materiais, enquanto o DNER/81 adota um critério empírico baseado na experiência acumulada ao longo dos anos. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre os métodos, principalmente em condições de tráfego elevado, onde o MeDiNa apresentou camadas de revestimento mais espessas em comparação ao DNER/81. Além disso, as diferentes classes de revestimento também influenciaram nos resultados obtidos. Foi observado também que a variação do CBR do subleito não exerceu influência significativa na espessura final do revestimento na maioria dos casos estudados, o que destaca a importância da escolha do método de dimensionamento, considerando não apenas os resultados obtidos, mas também a disponibilidade de dados, a complexidade dos ensaios e a aplicabilidade prática de cada abordagem.

Palavras-chave: Dimensionamento de pavimentos. Método DNER/81. Método MeDiNa. Pavimentos flexíveis.

ABSTRACT

Brazil, due to its vast territorial extension, relies on an efficient transportation system for its economic development. The road transport mode plays a crucial role in connecting remote regions but faces significant challenges related to highway maintenance. Pavement deterioration, caused by climatic factors, heavy traffic, and deficiencies in construction and maintenance, directly impacts operational costs and the durability of road infrastructure. In this context, the need to improve pavement design methods becomes evident, especially given the increasing traffic volume and transported loads. In Brazil, the main methods used are the DNER/81 method, which is empirically based and focused on soil bearing capacity, and the MeDiNa method, which combines empirical and mechanistic approaches, allowing for a more detailed analysis of structural demands. This study aims to compare the variation in pavement surface thickness obtained using these two methods, considering different traffic conditions, subgrade bearing capacity, and pavement surface types (Class 1 and Class 4). In addition to the conceptual differences between the methodologies, as MeDiNa requires greater rigor in material characterization and the design process, common parameters were established for analysis. These include variations in load application (N) and the correlation of subgrade CBR to the resilient modulus in MeDiNa. Furthermore, the differences between the pavement surface types adopted in each method were analyzed, as MeDiNa considers the fatigue behavior of the asphalt layer based on the mechanical properties of materials, while DNER/81 follows an empirical criterion based on accumulated experience over the years. The results highlighted significant differences between the methods, particularly under high traffic conditions, where MeDiNa resulted in thicker pavement layers compared to DNER/81. Additionally, the surface class also influenced the obtained results. It was also observed that variations in subgrade CBR did not significantly impact the final surface thickness in most of the studied cases, emphasizing the importance of selecting the appropriate design method, considering not only the obtained results but also data availability, testing complexity, and the practical applicability of each approach.

Keywords: Pavement design. DNER/81 Method. MeDiNa Method. Flexible pavements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Gráfico de Distribuição das Rodovias por tipo de Pavimento.....	17
Figura 02 – Gráfico de crescimento da frota de veículos no Brasil.....	18
Figura 03 – Esforços em camadas do Pavimento.....	20
Figura 04 – Estruturas de Pavimento Rígido.....	22
Figura 05 – Estruturas do Pavimento Semirrígido.....	23
Figura 06 – Estruturas de Pavimento Flexível.....	23
Figura 07 – Simulação de deformação elástica no pavimento flexível.....	24
Figura 08 – Defeito de Fadiga na superfície do Pavimento.....	24
Figura 09 – Estruturas de Pavimento.....	27
Figura 10 – Determinação de espessuras do pavimento.....	31
Figura 11 – Simbologia utilizada.....	32
Figura 12 – Metodologia do Método MeDiNa.....	35
Figura 13 – Dados de Tráfego do Software MeDiNa.....	37
Figura 14 – Estado de tensões.....	44
Figura 15 – Estrutura do pavimento com variações de “N” e “CBR”.....	52
Figura 16 – Esquema representativo dos dimensionamentos.....	52
Figura 17 - Espessura Total do Pavimento.....	56
Figura 18 – Espessura acima da sub-base.....	57
Figura 19 – Exemplo de estrutura do pavimento flexível obtida pelo dimensionamento MeDiNa.....	60
Figura 20 – Estrutura do pavimento flexível obtida pelo Método DNER/81 com CBR 7%.....	63
Figura 21 – Estrutura do pavimento flexível obtida pelo Método DNER/81 com CBR 12%.....	64
Figura 22 - Gráfico das espessuras de pavimentos flexíveis para subleito com CBR de 7%.....	68
Figura 23 - Gráfico das espessuras de pavimentos flexíveis para subleito com CBR de 12%.....	68
Figura 24 - Gráfico do CBR do subleito por espessuras de Revestimento para o mesmo volume de tráfego ($2,5 \times 10^6$).....	70
Figura 25 - Gráfico do CBR do subleito por espessuras de Revestimento para o mesmo volume de tráfego (5×10^6).....	71
Figura 26 - Gráfico do CBR do subleito por espessuras de revestimento para o mesmo volume de tráfego (1×10^7).....	72
Figura 27 - Gráfico do CBR do subleito por espessuras de Revestimento para o mesmo volume de tráfego (5×10^7).....	73
Figura 28 - Gráfico do CBR do subleito por espessuras de Revestimento para o mesmo volume de tráfego (5×10^8).....	74
Figura 29 - Gráfico do volume de tráfego por espessuras de revestimento pelo método DNIT.....	75

Figura 30 - Gráfico do volume de tráfego por espessuras de revestimento pelo método MeDiNa, com revestimento Classe 1.....	76
Figura 31 - Gráfico do volume de tráfego por espessuras de revestimento pelo método MeDiNa, com revestimento Classe 4.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Granulometria dos materiais.....	28
Tabela 02 - Especificações gerais por camada.....	29
Tabela 03 - Coeficiente de Equivalência Estrutural.....	29
Tabela 04 - Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	30
Tabela 05 - Base de Dados dos Grupos de Materiais.....	42
Tabela 06 - Indicadores de Desempenho.....	43
Tabela 07 - Resumo de trabalhos anteriores.....	46
Tabela 08 - Correlação do Módulo de Resiliência, com base na equação de AASHTO (1993).....	54
Tabela 09 - Dados de Tráfego.....	55
Tabela 10 - Dados do Tráfego - MeDiNa.....	58
Tabela 11 - Revestimento obtido para os pavimentos flexíveis para subleito com CBR de 7%.....	65
Tabela 12 - Revestimento obtido para os pavimentos flexíveis para subleito com CBR de 12%.....	66
Tabela 13 - Área trincada e afundamento de trilha de roda dos pavimentos flexíveis.....	67

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AEMC	Análise Elástica Multicamada
AT	Área Trincada do Pavimento
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CBR	California Bearing Ratio (ISC)
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCR	Concreto Compactado a Rolo
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
FC	Fator de Carga
FFM	Fator de Fadiga da Mistura
FV	Fator de Veículo
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
I.S.C	Índice de Suporte Califórnia
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MR	Módulo de Resiliência
USACE	United States Army Corps of Engineers
VMD	Volume Médio Diário

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 Tipos de pavimentos.....	21
2.1.1 Rígido.....	21
2.1.2 Semirrígido.....	22
2.1.3 Flexível.....	23
2.1.3.1 Estrutura do Pavimento.....	25
2.2 Dimensionamento de Pavimentos.....	27
2.2.1 Método DNER/81.....	28
2.2.1.1 Particularidades do método.....	33
2.2.2 Método MeDiNa.....	33
2.2.2.1 Parâmetros do Método MeDiNa.....	35
2.2.2.1.1 Parâmetros de Entrada.....	35
2.2.2.1.2 Análises e Critérios de Aceitação.....	42
2.3 Revisão de Trabalhos Acadêmicos Correlatos.....	45
3 METODOLOGIA.....	50
3.1 Estruturação do método.....	50
3.2 Exemplificação do método.....	54
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	62
4.1 Resultados.....	62
4.2 Análise e discussão dos resultados.....	67
4.3.1 Influência do CBR no dimensionamento.....	70
4.3.2 Comportamento dos Métodos de Dimensionamento.....	74
4.3.3 Variação de Volumes de Tráfego.....	77
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
5.1 Influência da variação do CBR do Subleito.....	78
5.2 Influência do volume de tráfego.....	78
5.3 Influência da classe de revestimento.....	78
5.4 Influência do método de dimensionamento.....	78
5.5 Sugestões para trabalhos futuros.....	79
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS.....	83

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de grande extensão territorial, de proporções continentais, seu desenvolvimento econômico depende de um eficiente modal de transportes. O modal rodoviário contribui de forma crucial nesse desenvolvimento, pois tem a capacidade de conectar as regiões mais remotas, que apresentam maior dificuldade de acesso por outros modais. Além do grande poder de integração intermodal, apresenta alta competitividade, infraestrutura relativamente desenvolvida e ainda contribui para o desenvolvimento regional.

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), apesar da grande importância do modal rodoviário, os investimentos para manutenção e ampliação da malha rodoviária do Brasil não acompanham a necessidade do crescimento e desenvolvimento do país, que necessariamente trazem consigo maior volume de tráfego e crescente necessidade de intervenções e melhorias das rodovias. A Pesquisa CNT de Rodovias (2024), informa que 67% das rodovias foram avaliadas como Regular, Ruim ou Péssimo, o que contribui para o aumento do custo de operação do transporte, seja na forma de manutenção dos equipamentos que sofrem desgastes acelerados, seja no aumento do consumo de combustível. O estudo ainda revela que os defeitos no pavimento são percebidos em média, sete meses após a entrega da obra rodoviária.

Os pavimentos se deterioram devido à exposição ao clima e ao tráfego, resultando em defeitos na superfície de rolamento. Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), os pavimentos podem apresentar defeitos estruturais, que comprometem o suporte de cargas, e defeitos funcionais, que afetam a qualidade de rolamento e a segurança. Entre os principais defeitos encontrados destacam-se buracos, ondulações, fissuras, afundamentos e trincas. Estes problemas, de acordo com a Confederação Nacional de Transportes (2017), surgem, igualmente, por resultados de fatores como a má execução das obras, a falta da manutenção adequada e escolha das dimensões utilizadas na fase de projeto que impactam diretamente o transporte terrestre.

De acordo com Lopes et al. (2022), o aumento significativo do volume de tráfego nas rodovias brasileiras, aliado à diversidade de veículos que circulam com

diferentes números de eixos e cargas transportadas, além da frequente ocorrência de deformações nos pavimentos, têm evidenciado a necessidade de atualização dos métodos de dimensionamento de pavimentos. Diante desse cenário, destacam-se abordagens como o método do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), mais conhecido como Método DNER/81, e o Método Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis (MeDiNa). Essas metodologias surgem como alternativas para aprimorar a precisão e a eficácia no projeto de pavimentos, visando atender às demandas atuais da infraestrutura viária do país.

Souza (2019) e Melo (2021), trazem análises comparativas de dimensionamento de pavimento entre o método empírico mais utilizado no Brasil, o Método DNER/81 e o novo método mecanístico-empírico que vem sendo elaborado pelo DNIT desde 2015, conhecido como Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa. Enquanto o método empírico se baseia em dados como volume de tráfego e valores de CBR obtidos em ensaio, o método MeDiNa analisa tensões, deslocamentos e danos que ocorrem nas diferentes camadas da estrutura do pavimento no decorrer da sua vida útil.

Visando contribuir para a base de dados dos diferentes métodos de dimensionamento, este trabalho de conclusão de curso busca apresentar os resultados de um pavimento hipotético, dimensionados pelos dois métodos aqui apresentados, com base nas variações de volume de tráfego e nas características mecânicas do material do subleito.

1.1 Justificativa

O dimensionamento de pavimentos é o processo de calcular a espessura e os materiais necessários para construir uma estrada capaz de suportar as solicitações de cargas provenientes do tráfego e as condições ambientais ao longo da sua vida útil. Atualmente, os métodos utilizados para dimensionamento foram desenvolvidos com base em abordagens empíricas ou mecanístico-empíricas. O método mais comum utilizado no Brasil baseia-se no valor de CBR dos materiais das camadas do pavimento para determinação das espessuras necessárias, como também considera

parâmetros de tráfego, como o número de repetições de um eixo padrão rodoviário de 8,2 toneladas (DNIT, 2017).

O cálculo das espessuras do pavimento utilizando métodos empíricos é baseado na observação e análise das condições do pavimento ao longo do tempo. Esse método utiliza parâmetros de campo, como a repetição das cargas e a resistência dos materiais. No entanto, sua principal limitação é a aplicabilidade restrita, pois só pode ser reproduzido fielmente em locais com condições climáticas semelhantes às das áreas onde as observações originais foram feitas (Franco, 2007). Portanto, dado que o Brasil possui condições climáticas que variam significativamente entre diferentes regiões devido à sua extensão continental, os métodos empíricos tornam-se desatualizados para essa análise, pois ele considera um único valor para todo o país, não capturando as especificidades regionais necessárias para um dimensionamento preciso (Peixoto, 2023).

Ademais, o método DNER/81 atende aos requisitos de deformações permanentes, mas não leva em consideração as deformações recuperáveis ou resilientes que podem levar à ruptura do pavimento por fadiga, que é um dos principais defeitos encontrados nas rodovias brasileiras. Logo, os métodos mecanístico-empíricos são mais adequados para a análise, pois adotam modelos teóricos sobre o comportamento estrutural das camadas do pavimento, ou seja, combinam modelos teóricos (mecanísticos) com métodos empíricos, já que é necessário considerar propriedades que podem variar ao longo do tempo e de acordo com as condições ambientais. Adicionalmente, o método DNER/81 tem uma abordagem ampla e generalista, e oferece uma análise superficial das possíveis variáveis que contribuem no desempenho dos pavimentos (Coutinho, 2011).

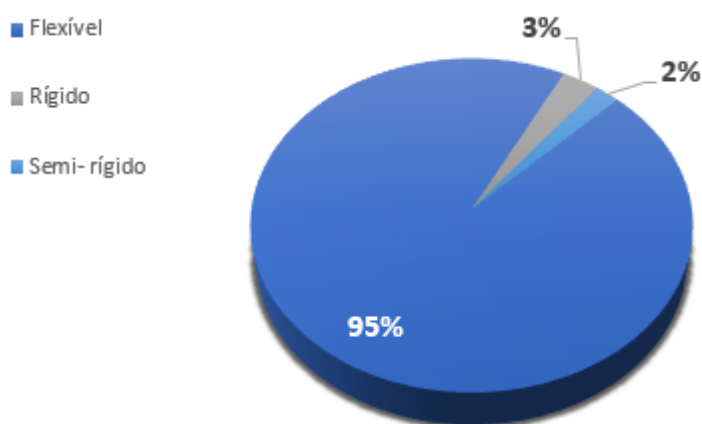
Apesar das desvantagens associadas à utilização do Método do DNER/81, este método de dimensionamento ainda apresenta alguns benefícios. Ele exige um número reduzido de ensaios de caracterização do solo, sendo que a determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) é realizada por meio de um ensaio amplamente utilizado, de fácil acesso e com um custo relativamente baixo, especialmente quando comparado ao investimento necessário para a obtenção dos valores de módulo de resiliência (MR) requeridos para a aplicação do método MeDiNa. Além disso, para vias de baixo volume de tráfego, o Método do DNER/81

ainda se mostra uma alternativa viável, pois, apesar de suas limitações, pode fornecer soluções adequadas e economicamente vantajosas para essas condições específicas.

De acordo com Peixoto (2023) o Método MeDiNa, por exemplo, além de considerar valores diferenciados para diversas condições climáticas, adota parâmetros como o módulo de resiliência, coeficientes de fadiga, além dos coeficientes de Poisson e de regressão. Com o auxílio do software desenvolvido pelo DNIT, esses valores expressam com precisão o comportamento do pavimento em relação ao volume de tráfego e à carga solicitada pelo eixo padrão, ou seja, a metodologia mecanística-empírica possui a capacidade de analisar diferentes parâmetros, potencializando seu desempenho funcional e estrutural (Sousa, 2019).

Dado que o Brasil possui uma das maiores redes rodoviárias do mundo, sendo 95% delas formadas por pavimentos flexíveis (DNIT, 2018), conforme ilustrado na Figura 01, essas compostas por várias camadas de materiais, como asfalto e agregados, eficazes para suportar tráfego leve e moderado e serem mais fáceis e rápidas para reparar. Do mesmo modo há o pavimento semirrígido, que assemelha-se estruturalmente com o pavimento flexível, porém conta com ligantes (cimento Portland ou cal hidratada) na camada de base (Balbo, 2007). Essas tecnologias são essenciais para a rede viária do Brasil visto sua necessidade de pavimentos que atendam às diversas condições climáticas e geográficas do país.

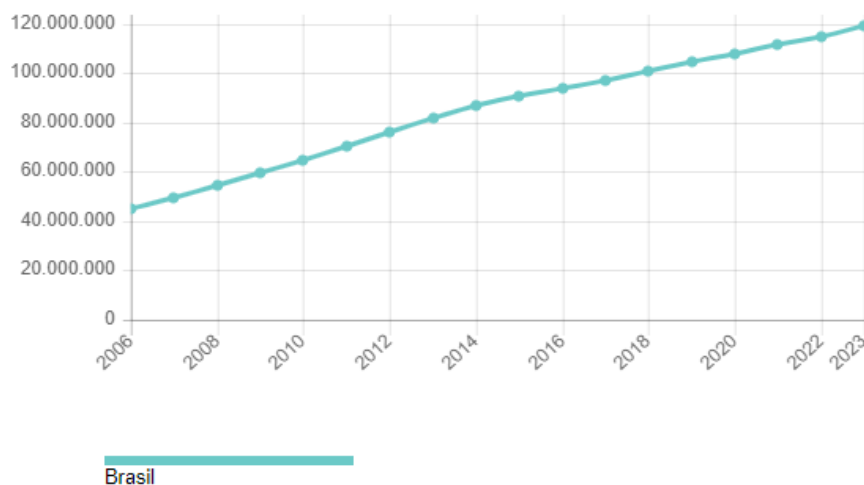
Figura 01 – Gráfico de Distribuição das Rodovias por tipo de Pavimento



Fonte: Autores (2025).

O dimensionamento de pavimentos eficientes, seguros e duráveis é crucial para a estrutura viária do Brasil, que conta com grande variedade de clima, disponibilidade de materiais e solos com diversas características mecânicas, além de um tráfego de veículos em constante crescimento, pois de acordo com dados do IBGE, o total de veículos registrados no Brasil passou de cerca de 45 milhões em 2023 para aproximadamente 120 milhões, como pode ser observado na Figura 02. Desta forma, este trabalho tem a intenção de identificar a influência das variações de dados de projeto em diferentes métodos de dimensionamento com estruturas alternativas de pavimento.

Figura 02 – Gráfico de crescimento da frota de veículos no Brasil



Fonte: IBGE (2023).

Nesse contexto, o presente trabalho visa dimensionar um pavimento flexível com base nos dois métodos, contribuindo na verificação das diferenças de aplicabilidade no Método MeDiNa em relação ao Método DNER/81, o que resulta na diminuição dos gastos durante sua realização e melhoria da vida útil do pavimento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Determinar a influência da variação do volume de tráfego, CBR do subleito e classe de revestimento no projeto de pavimentos rodoviários pelos diferentes métodos de dimensionamento: DNER/81 e MeDiNa, na obtenção da espessura do revestimento.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- a) Criar um pavimento flexível hipotético;
- b) Estabelecer a variação de materiais do subleito e volume de tráfego a serem adotadas;

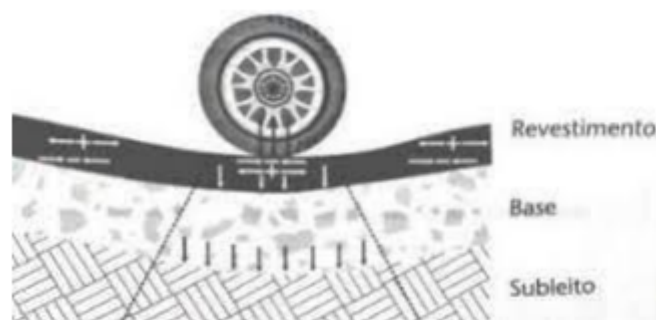
- c) Dimensionar os pavimentos pelo Método do DNER/81 (Empírico) e verificar pelo Método MeDiNa (Mecanístico - Empírico);
- d) Comparar e analisar as metodologias mencionadas em relação aos resultados obtidos nos dimensionamentos realizados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O ato de pavimentar uma via de circulação de tráfego desempenha um papel fundamental na infraestrutura urbana, proporcionando uma superfície adequada para o tráfego de veículos e pedestres, de modo que esta necessita ser mais regular, para garantia de melhor conforto no deslocamento, aderente e menos ruidosa aos utilizadores. Além de que as estruturas do pavimento devem ser capazes de suportar os esforços oriundos de cargas de ações climáticas, sem que apresentem deterioração prematura, dessa forma o dimensionamento dessas estruturas exercem um trabalho essencial, visto que dimensiona-se em função do volume de tráfego, das condições ambientais, como também em relação a viabilidade econômica e a disponibilidade de materiais, para assim suportar o volume constante de deslocamento, resistir os elementos naturais e contribuir para segurança dos usuários (Balbo, 2007, p.15).

O pavimento é composto de uma estrutura de variadas camadas de espessuras finitas, construídas sobre a superfície final de terraplenagem. (Bernucci et al., 2010). Cada camada possui a responsabilidade de atender a uma função específica, uma vez que as cargas aplicadas resultam em um estado de tensão destinada à estrutura do pavimento. Esse estado de tensão deve ser suportado de forma individual por cada camada e, ao mesmo tempo, pela estrutura como um todo (Balbo, 2007, p.35), conforme exposto na Figura 03.

Figura 03 – Esforços em camadas do Pavimento



Fonte: Balbo (2007).

Tradicionalmente os pavimentos são classificados em dois tipos: rígidos e flexíveis, porém de acordo com alguns estudos, é possível se utilizar camadas flexíveis e rígidas em uma mesma estrutura, estas são conhecidas como pavimentos

semirrígidos ou semi-flexíveis (CNT, 2017), ainda assim, sua classificação dependerá do tipo de revestimento utilizado e como as tensões serão distribuídas ao longo das camadas.

A estrutura do pavimento asfáltico é composta por quatro camadas essenciais: Revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, além de incluir o subleito, que consiste na fundação e de mesmo modo integra como parte de sua configuração que é amplamente reconhecida como uma das camadas mais significativas na estrutura de um pavimento, uma vez que existem situações de pavimentação que não requerem camadas de sub-base e reforço do subleito, entretanto, para que uma estrutura seja considerada pavimento, são essenciais as camadas de revestimento e de subleito (Balbo, 2007, p.36).

2.1 Tipos de pavimentos

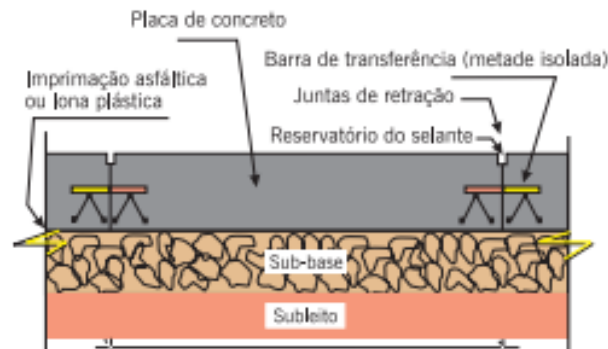
A classificação geral dos tipos de pavimentos asfálticos é fornecida pelo Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT, 2006) porém, como já citado, a especificação de cada pavimento dependerá do tipo do revestimento a qual será utilizado e como se comportam com o recebimento e distribuição das cargas oriundas do tráfego para as camadas inferiores.

2.1.1 Rígido

O pavimento pode ser considerado rígido quando a camada de revestimento apresenta uma elevada rigidez no que se diz respeito às camadas inferiores e por esta razão absorve, aproximadamente, todas as tensões vindas do carregamento aplicado. É composto por cimento Portland (concreto-cimento) e em função disso, também é conhecido como pavimento de concreto, uma vez que o revestimento é constituído por placas de concreto. Nesse caso, as camadas trabalham basicamente a tração, a qual seu dimensionamento ocorre em função das propriedades resistentes da placa de concreto, como resistência à flexão, e são apoiadas na subcamada que pode ser designada como sub-base, visto que a qualidade do material dessa camada equivale a sub-base dos pavimentos asfálticos,

ou seja, a camada de concreto funciona ao mesmo tempo como revestimento e base do pavimento, conforme exemplificado na Figura 04 (Bernucci et al., 2010; Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

Figura 04 – Estruturas de Pavimento Rígido



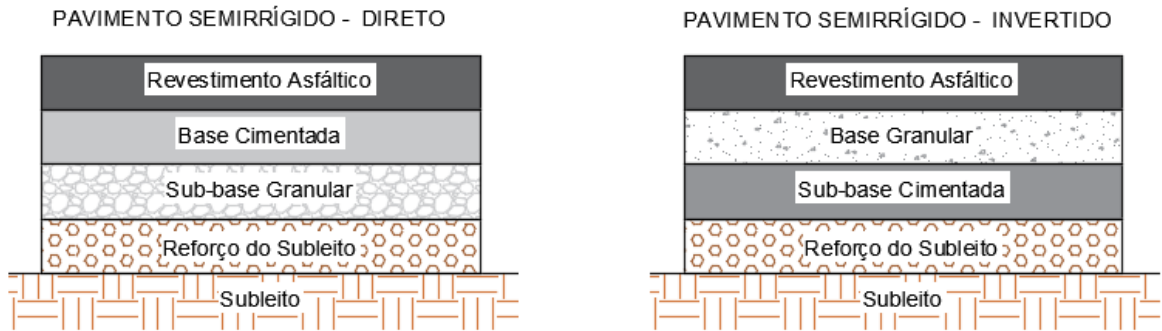
Fonte: Bernucci et al. (2010).

2.1.2 Semirrígido

Estes pavimentos são caracterizados como semirrígidos quando há a utilização de base cimentada, como o solo cimento, sob um revestimento betuminoso, que resiste aos esforços de tração. São compostos por camadas de revestimento, base cimentada, sub-base granular, reforço do subleito e subleito. Nos pavimentos semirrígidos, assim como nos flexíveis, são aplicados revestimentos de materiais asfálticos. A distinção entre eles encontra-se na presença de ligantes hidráulicos, cimento ou cal hidratada, visando conferir uma camada com rigidez adequada para suportar as cargas de tráfego previstas (Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

O pavimento semirrígido é reconhecido por suas duas variações, as quais são determinadas pela forma como foram construídas. Há o pavimento do tipo direto que ocorre quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre a camada de base cimentada, e do tipo indireto, conhecido também como invertido, quando a camada de revestimento é construída sobre a camada de base granular e a sub-base cimentada, que podem ser visualizados na Figura 05 abaixo.

Figura 05 – Estruturas do Pavimento Semirrígido

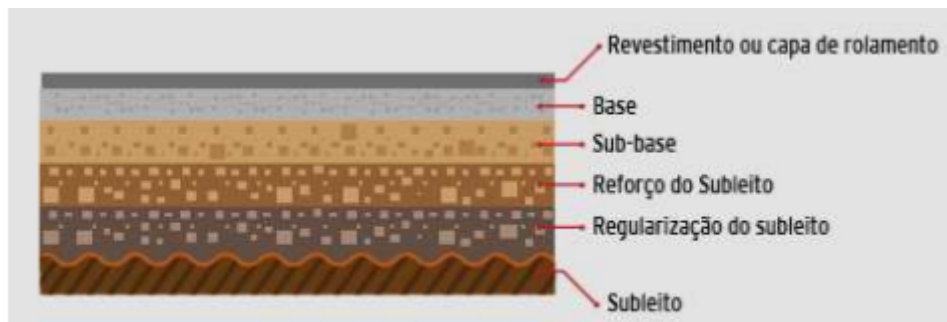


Fonte: Autores (2025).

2.1.3 Flexível

Os pavimentos chamados de flexíveis são aqueles em que os esforços são distribuídos de forma uniforme pelas camadas, isto é, todas as camadas sofrem deformação elástica proveniente do esforço aplicado, por este motivo, os pavimentos flexíveis tendem a seguir a estruturação de uma seção típica do pavimento: revestimento asfáltico, base, sub-base, reforço do subleito e subleito, conforme mostrado na Figura 06 (Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

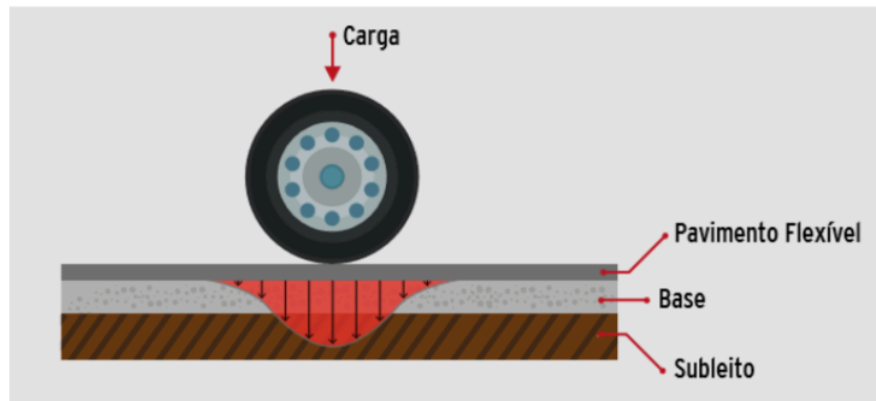
Figura 06 – Estruturas de Pavimento Flexível



Fonte: CNT (2017).

Uma vez que as cargas decorrentes do tráfego se distribuem de forma equivalentes entre as camadas, forma-se um campo de tensões nas proximidades onde esta carga foi aplicada, o que requer que as camadas do pavimento sejam mais espessas, com o objetivo de proteger o subleito, conforme ilustrado na Figura 07. Essas são constituídas por materiais granulares, solo, solos-agregados, entre outros (CNT, 2017; Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

Figura 07 – Simulação de deformação elástica no pavimento flexível



Fonte: CNT (2017).

No Brasil, o pavimento flexível é o mais empregado, principalmente pelo seu custo de implantação, porém os dois principais defeitos encontrados são a fadiga e a deformação permanente. O defeito de fadiga ocorre devido à repetição da aplicação das cargas provenientes do tráfego ao longo tempo, o que provoca o surgimento de trincas e fissuras na superfície do pavimento. Essas fissuras são causadas pelo esforço cíclico das cargas, levando a formação de pequenas rachaduras que se propagam gradualmente e assim comprometem a integridade estrutural do pavimento, conforme ilustrado na Figura 08.

Figura 08 – Defeito de Fadiga na superfície do Pavimento



Fonte: Bernucci et al. (2010).

Já o defeito de deformação permanente, também conhecido como afundamento de trilha de roda, é causado pela deformação plástica e cumulativa das camadas do pavimento, principalmente nas áreas de rodagem, em que as cargas

são aplicadas de forma repetida e concentrada. Isso resulta nesses afundamentos de “trilha de roda” na superfície do pavimento.

Segundo a CNT (2018), a deformação permanente pode ser classificada em duas formas principais: Afundamento plástico que caracteriza-se pela depressão da superfície do pavimento acompanhada de solevamento lateral (compensação volumétrica). Quando ocorre em uma extensão de até 6 metros, é denominado afundamento plástico local. Se a extensão ultrapassa 6 metros e está alinhada à trilha de roda, recebe a denominação de afundamento plástico de trilha de roda. E também como Afundamento por consolidação, que se diferencia do afundamento plástico por não apresentar solevamento lateral. Quando a extensão do defeito é de até 6 metros, é chamado de afundamento de consolidação local. Se ultrapassa 6 metros e está ao longo da trilha de roda, é denominado afundamento de consolidação de trilha de roda.

2.1.3.1 Estrutura do Pavimento

Segundo o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (Brasil, 2006) o pavimento é uma estrutura composta por diferentes camadas, em que seus materiais de diferentes resistências e deformabilidades são colocados em contato um com outro, ocasionando para um cálculo de tensões e deformações resultantes das cargas do tráfego com um alto nível de complexidade. Dessa maneira, para garantir as condições mínimas impostas, o pavimento deve possuir seis camadas principais, sendo elas: regularização do subleito, subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico (Souza, 2019), dependendo de cada tipo de pavimento.

A regularização do subleito não constitui propriamente uma camada da estrutura do pavimento, de fato, é a camada posta sobre o leito, que é a superfície obtida pela terraplenagem, uma operação necessária que pode ser reduzida em corte do leito implantado ou em sobreposição a este, com espessura variável. Em outros termos, a regularização tem como objetivo corrigir e regular a superfície do subleito (Manual de Pavimentação DNIT, 2006, p.106).

O subleito é o terreno de fundação do pavimento, a qual deve ser limitado até a profundidade onde atuam as cargas provenientes do tráfego. Em termos

práticos, esta profundidade deve estar situada entre uma faixa de 0,60 m a 1,50 m, que é constituída por materiais naturais ou transportados, consolidados e compactados (Balbo,2007, p.37; Manual de Pavimentação DNIT, 2006, p.95).

O reforço do Subleito, conforme o nome sugere, é utilizado para reforçar o terreno de fundação, quando ele apresenta pequena resistência aos esforços verticais que ocorreriam sobre a sua superfície. Por esta razão o reforço necessita do emprego de materiais de melhor qualidade para que a fundação subjacente receba pressões de menor resistência. Seu emprego não é obrigatório, porém é posto por questões técnicas-econômicas, dado que os subleitos com baixa resistência exigem camadas mais espessas de base e sub-base para receber os esforços vindos do tráfego, dependendo do tipo de pavimento (Balbo,2007, p.38).

A sub-base é a camada complementar a base, utilizada quando a camada de base é muito espessa, e por questões técnicas-econômicas, é necessário dividi-la em duas camadas, criando assim a sub-base. Estas podem ser constituídas por solo estabilizado, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, concretos, entre outros (Balbo,2007, p.38). Logo, a camada está localizada acima do subleito ou do reforço do subleito, como também inferior à base, sendo responsável pela distribuição dos esforços verticais provenientes das camadas acima e também desempenhar papel importante na drenagem subsuperficial dos pavimentos.

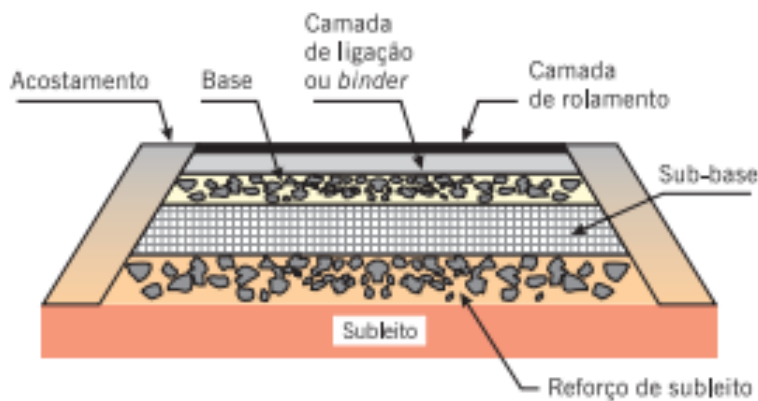
Conforme o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (Brasil, 2006), a base é a camada responsável por resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego para as camadas inferiores, a qual a camada de revestimento é construída sobre. Estas podem ser constituídas por solo estabilizado, misturas de solos e agregados, brita graduada, concretos e entre outros.

O revestimento é a camada superior da estrutura de pavimento, empregada acima da camada de base, sendo por penetração ou mistura. É responsável por receber as cargas diretamente da ação do rolamento dos veículos, estáticas ou dinâmicas, sem sofrer deformações ou degradações de seus componentes, transmitindo assim para as camadas inferiores, bem como exercer a função de impermeabilizar a camada de base e melhorar as condições de segurança e conforto de rolamento. Por esta razão, o revestimento necessita ser composto de

materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira que evite sua movimentação horizontal, como blocos pré-moldados de concreto, placas de concreto, concreto compactado com rolo, tratamentos superficiais e misturas asfálticas (Bernucci et al., 2010, Balbo,2007; Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

Geralmente, os revestimentos asfálticos são subdivididos em duas ou mais camadas por razões econômicas e construtivas, Balbo (2007), menciona que é comum encontrar outras terminologias como “camada de rolamento” e “camada de ligação” para descrever esses revestimentos. Portanto, a camada de rolamento seria aquela que há contato diretamente com as cargas e ações ambientais oriundas do tráfego e a camada de ligação, também conhecida como *binder*, seria a camada intermediária localizada entre a camada de rolamento e a base da estrutura asfáltica, que pode ser ilustrado na Figura 09.

Figura 09 – Estruturas de Pavimento



Fonte: Bernucci et al. (2010).

2.2 Dimensionamento de Pavimentos

O dimensionamento de pavimentos é o passo essencial para ter rodovias duráveis e eficazes para resistir às cargas provenientes do grande volume de tráfego. No Brasil, dois dos métodos mais utilizados são o Método DNER/81 (Método do CBR) e o Método MeDiNa. O método DNER/81, desenvolvido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, baseia-se na avaliação da capacidade de suporte do solo por meio do Índice CBR (*California Bearing Ratio*), permitindo a definição das espessuras conforme o tráfego previsto e as condições do subleito.

Por outro lado, o método MeDiNa combina análises empíricas e mecânicas, proporcionando uma avaliação mais abrangente das condições do pavimento com base em especificidades regionais e as demandas do tráfego (Peixoto, 2023).

2.2.1 Método DNER/81

O método DNIT é o mais empregado no Brasil para dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos, de acordo com Medina e Motta (2005), segue as orientações do Manual de Pavimentação, publicado primeiramente na década de 1960 pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza. O manual encontra-se na terceira edição publicada em 2006, é baseado no método de dimensionamento empírico do CBR, sugerido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE, 1962), este por sua vez adota coeficientes de equivalência estrutural dos materiais constituintes das camadas do pavimento, obtidos na Pista Experimental da Associação Americana de Rodovias e Transporte (AASHTO).

A capacidade de suporte das camadas constituintes do pavimento é determinada pelo Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio*, CBR) obtido por meio de ensaios de corpo de prova realizados em laboratório. A partir dos dados empíricos, constituíram-se as faixas granulométricas (Tabela 01), além das especificações gerais (Tabela 02) recomendados dos materiais presentes nas diferentes camadas.

Tabela 01 - Granulometria dos materiais

PENEIRAS	Porcentagem em peso passando			
	A	B	C	D
2"	100	100	—	—
1"	—	75-90	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25

Fonte: DNIT (2006).

Tabela 02 - Especificações gerais por camada

Camada	Valores estabelecidos				
	Expansão no CBR	CBR	Índice de Grupo (IG)	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)
Subleito	≤ 2%	≥ 2%	-	-	-
Reforço SL	≤ 1%	≥ subleito	-	-	-
Sub-base	≤ 1%	≥ 20%	0	-	-
Base	≤ 0,5%	≥ 80%	-	≤ 25%	≤ 6%

Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

São ainda estabelecidos Coeficientes de Equivalência Estrutural distintos, de acordo com os materiais utilizados no pavimento, expostos na Tabela 03 a seguir:

Tabela 03 - Coeficiente de Equivalência Estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: DNIT (2006).

No dimensionamento pelo método do DNER/81, a espessura mínima dos revestimentos asfálticos é determinada em função do tráfego, mais precisamente do número N de repetições de cargas equivalentes do eixo padrão de 8,2 tf, durante o período de projeto adotado. É pretendido com o estabelecimento da espessura mínima (Tabela 04), proteger a camada de base dos esforços provenientes do

tráfego e evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração (Manual de Pavimentação DNIT, 2006).

Tabela 04 - Espessura mínima de revestimento betuminoso

N	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 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

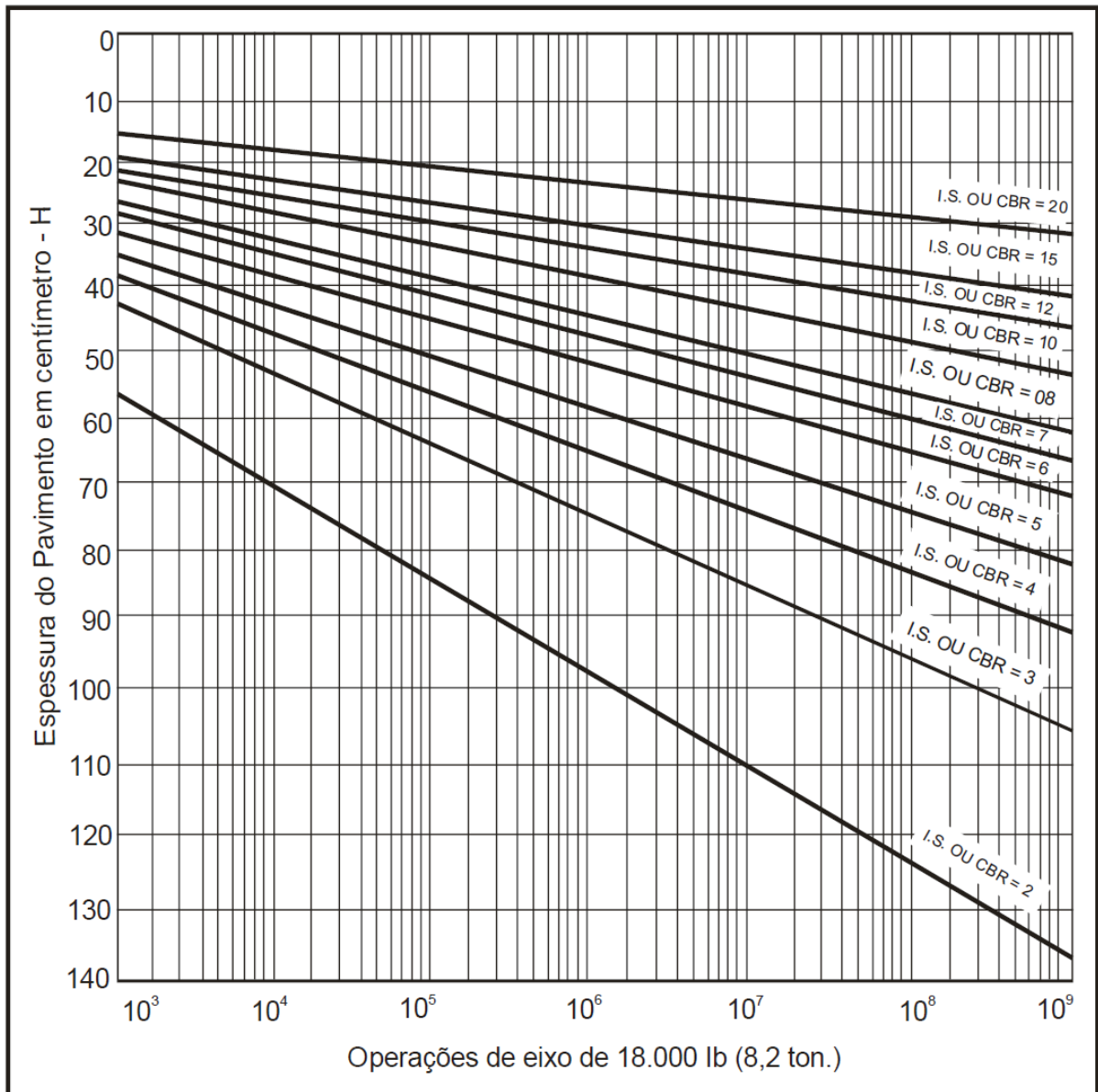
Fonte: DNIT (2006).

Presume-se sempre que existe uma drenagem superficial adequada e que o lençol freático foi rebaixado para, no mínimo, 1,50 m abaixo do greide de regularização (DNIT, 2006).

Para o dimensionamento do pavimento, o efeito do desgaste considerado é o número de operações de rodagem (N). Este valor leva em consideração fatores como clima, carga e eixo, bem como a vida útil estimada, permitindo uma estimativa empírica da espessura do pavimento necessária para garantir segurança ao usuário por um período de tempo estimado (DNIT, 2006).

Este dimensionamento, baseado no método do DNER/81, é realizado com auxílio de um ábaco, partindo do pressuposto de que o valor de N e as propriedades dos materiais utilizados nas camadas do pavimento são conhecidos, como os valores de I.S.C ou C.B.R. Esses cálculos relacionam os valores de espessura, CBR e N aplicáveis a cada camada do pavimento. A espessura fornecida por este gráfico é em termos de material com $K = 1,00$, ou seja, em termos de base granular. No ábaco, deve-se inserir o valor de N na abscissa, traça-lo verticalmente até encontrar a linha representativa da capacidade de suporte (I.S.C. ou C.B.R.) em questão, e, então, seguir horizontalmente para encontrar a espessura do pavimento na ordenada, conforme ilustrado na Figura 10 abaixo (DNIT,2006).

Figura 10 – Determinação de espessuras do pavimento



$$H_t = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot CBR^{-0,598}$$

Fonte: DNIT (2006).

A partir da obtenção dos coeficientes e espessuras das camadas, são determinadas as espessuras reais das camadas, por meio das inequações a seguir, com ilustração na Figura 11 (DNIT, 2006):

Equação 01 – Base

$$R \times Kr + B \times Kb \geq H_{20}$$

Equação 02 – Sub-base

$$R \times Kr + B \times Kb + h_{20} \times Ks \geq H_{20}$$

Equação 03 – Reforço do subleito

$$R \times Kr + B \times Kb + h_{20} \times Ks + h_n \times K_{Ref} \geq H_m$$

Em que:

R Espessura da camada de revestimento;

K_R Coeficiente de equivalência estrutural da camada de revestimento;

B Espessura da base;

K_B Coeficiente de equivalência estrutural da camada de base;

H₂₀ Espessura equivalente acima da sub-base;

h₂₀ Espessura da sub-base;

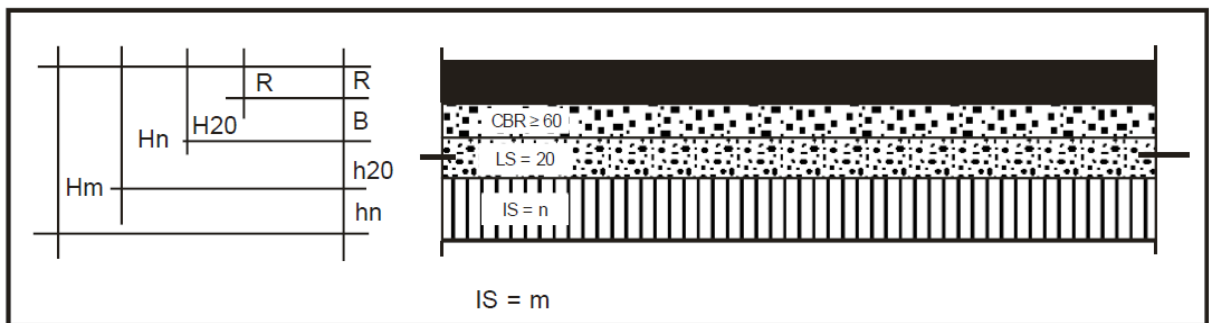
K_S Coeficiente de equivalência estrutural da camada de sub-base;

h_n Espessura do reforço do subleito;

K_{Ref} Coeficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito;

H_m Espessura teórica total do pavimento.

Figura 11 – Simbologia utilizada



Fonte: DNIT (2006).

Segundo o Manual de Pavimentação elaborado pelo DNIT (2006), mesmo que o valor de CBR ou I.S.C da sub-base seja superior a 20, a espessura do pavimento necessária para protegê-la é determinada considerando esse valor como 20. Por este motivo, são utilizados os símbolos H_{20} e h_2 para designar, respectivamente, a espessura do pavimento sobre a sub-base e a espessura da própria sub-base.

Para as camadas granulares, estabelecem-se limites de espessura durante o processo de compactação, sendo o máximo permitido de 20 cm e o mínimo de 10 cm. Além disso, é exigida uma espessura construtiva mínima de 15 cm para camadas cimentadas e espessura construtiva superior a 10 cm para materiais não cimentados, assegurando a integridade e desempenho estrutural da pavimentação (DNIT, 2006).

2.2.1.1 Particularidades do método

- Quando o CBR da Sub-base for maior ou igual a 40% e o número “N” for inferior à 10^6 , permite-se substituir “ H_{20} ” por “ $0,8 \times H_{20}$ ”, na Eq. 01;
- Para $N > 10^7$ é recomendado substituir “ H_{20} ” por “ $1,2 \times H_{20}$ ”, na Eq. 01;
- Na ausência de dados sobre o material de base, sub-base e reforço do subleito, deve-se utilizar $K = 1,0$;

2.2.2 Método MeDiNa

O método MeDiNa consiste em uma metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) no Brasil. Sua finalidade é simplificar e facilitar a elaboração de projetos de pavimentação flexível, considerando as particularidades e recursos específicos do país. Esse método foi desenvolvido através de uma colaboração entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), com o objetivo de ajudar e atualizar o cálculo de espessuras de pavimentos asfálticos por meio da análise mecânica (DNIT, 2020).

MeDiNa é a junção das iniciais do nome “Método de Dimensionamento Nacional” e recebeu esse título, também, em homenagem a Jacques de Medina, responsável pelos estudos do método mecanístico no Brasil, que publicou a primeira versão em 2018 através de experiências que foram adquiridas em seu projeto de mestrado realizado nos Estados Unidos em 1950 (DNIT, 2020).

A diferença deste método, com relação aos adotados em outros anos anteriores pelo DNIT, é a obrigatoriedade da abordagem mecanística-empírica na análise da estrutura dos pavimentos. Neste método de análise, a estrutura é examinada a partir da determinação das tensões, deformações e deslocamento do sistema de camadas em relação ao carregamento aplicado, e conforme as propriedades dos materiais utilizados, as quais devem ser previamente obtidas de forma experimental através de ensaios de laboratórios. Logo, os resultados são utilizados para prever o comportamento do pavimento durante toda a sua vida útil e garantir um bom desempenho quanto às deformações (Knabben e Carpio, 2020).

Os cálculos referentes às tensões, deformações e deslocamentos da estrutura devem ser realizados por meio do Software MeDiNa, através da Análise Elástica Multicamadas (AEMC). Esse programa utiliza como informações iniciais as dimensões das camadas, as propriedades mecânicas dos materiais, como módulo de resiliência e coeficiente de Poisson, que constituem as camadas e as cargas geradas pela circulação de veículos. Além de para um bom funcionamento do Software, é necessário a definição do Número Equivalente de Eixos, o número N, em razão de que os modelos utilizados pelo programa, se mostram sensíveis a pequenas variações, por isso, uma estimativa apurada é de grande importância. Após a obtenção desses parâmetros, o software analisa se a aplicação repetida de carga resultará em danos excessivos ao revestimento asfáltico ou às camadas de cimento, ou ainda em afundamento na trilha de roda acima do limite estipulado (DNIT, 2020; Knabben e Carpio, 2020).

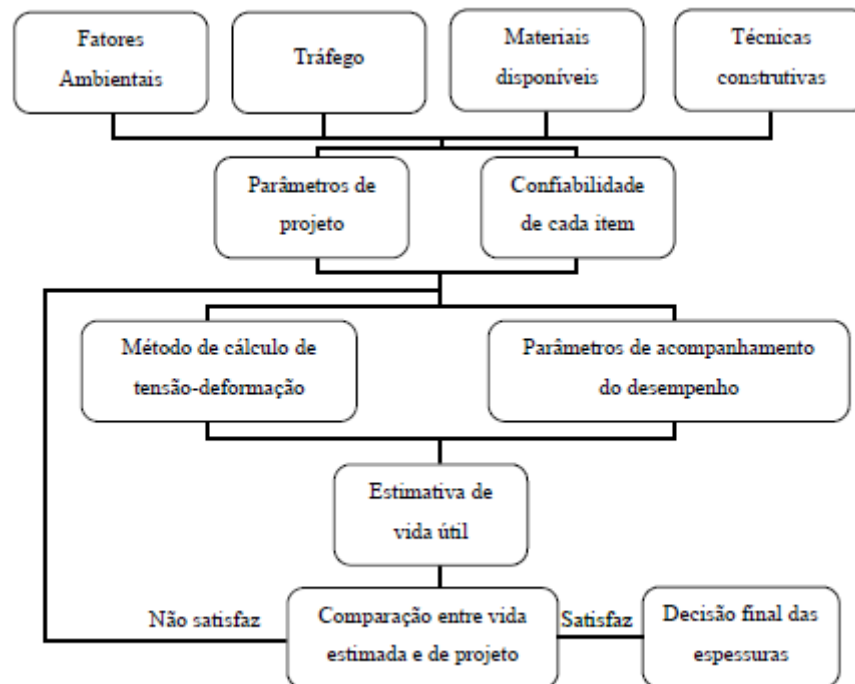
Logo, o programa MeDiNa considera as tensões e deslocamentos das diversas camadas da estrutura do pavimento, e avalia os danos causados em todas as camadas constituintes, estes representados pelas áreas trincadas da superfície do revestimento asfáltico e pela formação de trilha de roda nas demais camadas,

produzindo relatórios progressivos desses danos ano a ano ao longo da duração do projeto prevista, conforme Lopes et al. (2022).

2.2.2.1 Parâmetros do Método MeDiNa

O processo de dimensionamento da pavimentação depende de variáveis de difícil previsão, como o comportamento dos materiais constituintes de cada camada em relação à aplicação da carga e a resposta que a estrutura dará em função de mudanças climáticas que ocorrerão no período previsto (Franco, 2007). A metodologia do método MeDiNa é dividida entre fatores ambientais, tráfego, materiais, dimensionamento mecânico-empírico e os critérios de desempenho, espessuras e vida útil, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Metodologia do Método MeDiNa



Fonte: Motta (1991).

2.2.2.1.1 Parâmetros de Entrada

O Método MeDiNa utiliza uma série de parâmetros de entrada essenciais para a análise e dimensionamento de pavimentos, os quais são gerenciados pelo Software MeDiNa. Alguns dos principais parâmetros incluem: Número de operações

de rodagem (N), módulo de resiliência (MR), coeficiente de fadiga, coeficiente de Poisson e coeficiente de regressão. Esses parâmetros, entre outros, são utilizados pelo Software para simular o comportamento do pavimento ao longo de sua vida útil, permitindo uma análise mais precisa e eficiente na escolha dos materiais e na definição das espessuras das camadas.

a) Número N

No software MeDiNa, o valor do número N pode ser determinado através da inserção dos dados de contagem do tráfego ou pela modificação dos valores do volume médio diário (VMD), da porcentagem de veículos na faixa de projeto e da taxa de crescimento anual (Knabben e Carpio, 2020).

Para o cálculo do número N a partir da contagem do tráfego, deverá ser selecionado o tipo de eixo para todos os tipos de veículos que fazem parte da contagem, assim, o Software preencherá automaticamente o Valor da Carga, Fator de Carga (FC) e Fator de Veículo (FV). Em conjunto com os dados de tráfego, VMD, a % Veículos na faixa de projeto, a Taxa de crescimento (%) e o Período de projeto, o valor do N Total será calculado automaticamente pelo software. Se o valor de N já estiver calculado, é possível fixar o valor do Fator de Veículo em 1 e ajustar os campos de dados de tráfego até que o valor do campo N Total corresponda ao resultado previamente obtido (Knabben e Carpio, 2020).

A figura 13 abaixo corresponde aos Dados de tráfego e indica onde esses parâmetros podem ser ajustados no Software MeDiNa, além disso é possível selecionar o tipo de via a ser dimensionada, a qual não irá alterar o valor do número N, apenas a confiabilidade do dimensionamento do pavimento.

Figura 13 – Dados de Tráfego do Software MeDiNa

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
FV:	1,000
N anual (1º ano):	5,00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+06

Fonte: Software MeDiNa (2024).

b) Módulo de Resiliência - MR

O módulo de resiliência é a razão das cargas repetitivas pela deformação elástica. Sob a aplicação de uma carga, o material sofre deformação, na qual uma parte é recuperada após a remoção da carga (comportamento elástico ou recuperável), enquanto outra parte pode resultar em uma deformação permanente (acumulada). O MR é determinado com base na deformação elástica; contudo, com a aplicação repetitiva de cargas ao longo da vida útil do pavimento, a deformação acumulada tende a aumentar, o que pode reduzir a deformação recuperável e, conseqüentemente, alterar o valor efetivo do módulo de resiliência ao longo do tempo.

De acordo com o Manual de Utilização do Programa MeDiNa (DNIT, 2020), os materiais das camadas podem ser considerados como elásticos lineares ou não lineares. Os modelos constitutivos do comportamento resiliente são representados a partir da definição das constantes apresentadas pela equação 04, aplicada a materiais granulares e solos, em que seu MR depende predominantemente da variação da tensão de confinamento e da tensão desvio.

Equação 04 – Módulo de Resiliência

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$$

Onde:

- MR: Módulo de resiliência em MPa;
- k_1 , k_2 , k_3 : parâmetros obtidos experimentalmente a partir da regressão estatística dos resultados dos ensaios;
- σ_3 : tensão confinante em MPa;
- σ_d : tensão desvio em MPa.

O módulo de resiliência (MR) influencia diretamente na durabilidade e resistência do pavimento, além de ajudar a prever o desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil, um adequado MR pode reduzir a ocorrência de defeitos como fissuras, trincas e afundamentos. O valor do MR pode variar dependendo do tipo de material utilizado (solo, sub-base, base, revestimento). Por exemplo, para bases estabilizadas, é considerado que o módulo de resiliência decai ao longo do tempo com um comportamento do tipo sigmoidal, variando entre dois limites: Limite inicial, aquele obtido a partir do ensaio de laboratório e o Limite final, aquele que a camada apresentaria no final da sua vida útil. Por isso é necessário inserir no software MeDiNa o valor inicial do módulo de resiliência e o módulo final, que deve ser similar ao do material sem estabilização com ligante hidráulico (Knabben e Carpio, 2020).

O módulo de resiliência é utilizado em conjunto com outros parâmetros, como coeficientes de fadiga e de Poisson, para realizar cálculos precisos sobre a resposta do pavimento às cargas.

c) Fadiga

Custódio (2002) destaca que, no contexto das misturas asfálticas, o fenômeno da fadiga é um dos principais fatores que contribuem para a ruptura

estrutural dos pavimentos flexíveis. Esses pavimentos são constantemente submetidos a carregamentos instantâneos e cíclicos devido ao tráfego de veículos, o que resulta na formação de microfissuras, especialmente na fibra inferior do revestimento. Essas microfissuras surgem como consequência das tensões e deformações de tração nessa região, influenciadas pela rigidez das camadas, bem como por suas respectivas espessuras e módulo de resiliência (MR). Com o tempo, a propagação e o acúmulo dessas microfissuras levam à redução da rigidez do pavimento, aumentam as deflexões e, por fim, resultam em falha por fadiga.

O software MeDiNa realiza a análise da fadiga em misturas asfálticas com base em diferentes parâmetros e ensaios laboratoriais. Ele trabalha com seis tipos teóricos de misturas asfálticas e dois tipos modificados por polímero, servindo como referência para os projetistas no dimensionamento dos pavimentos. Durante a execução da obra, é necessário obter os parâmetros da Curva de Fadiga e do Módulo de Resiliência (MR) a partir do projeto da mistura asfáltica (DNIT, 2020).

De acordo com o Manual de Utilização do Programa MeDiNa (DNIT, 2020) a curva de fadiga das misturas asfálticas é determinada por meio de ensaios de carregamento repetido, nos quais se aplica uma tensão constante ao material. O método utilizado para isso é o ensaio de compressão diametral de tração indireta, que avalia a resistência da mistura à fadiga. A relação entre o número de ciclos de carregamento e a deformação específica resiliente é fundamental para definir essa curva e prever o comportamento do pavimento ao longo do tempo. Devem ser observados, principalmente, a qualidade dos materiais asfálticos. O projetista deve dar atenção especial ao Módulo de Resiliência e aos parâmetros k_1 e k_2 da curva de fadiga, pois eles influenciam diretamente a durabilidade da estrutura.

A equação apresentada abaixo é utilizada para calcular a vida de fadiga de misturas asfálticas, ou seja, o número de ciclos de carregamento até que ocorra a falha por fadiga no pavimento.

Equação 05 – Fadiga

$$N_{fad} = k_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2}$$

onde:

- Nfad: Número de ciclos até a fadiga.
- k1: Coeficiente experimental ajustado a partir de ensaios laboratoriais.
- ε_t : Deformação específica de tração.
- k2: Expoente experimental determinado a partir de testes de laboratório.

Após a inserção dos parâmetros de fadiga do concreto asfáltico, o software realiza uma classificação da mistura asfáltica, permitindo a diferenciação das misturas avaliadas com base na Classe de Fadiga (Knabben e Carpio, 2020).

Os coeficientes de fadiga são empregados para avaliar a resistência do pavimento à fadiga, ou seja, à deterioração progressiva causada pelas repetições de cargas ao longo do tempo. Eles são usados para prever a vida útil das camadas do pavimento antes do aparecimento de trincas. Para a fadiga, o software utiliza coeficientes específicos que descrevem a relação entre a tensão aplicada e o número de ciclos que o material pode suportar antes de falhar.

Estes coeficientes são inseridos como parte dos parâmetros de entrada para o dimensionamento, e o software analisa a probabilidade de falha por fadiga com base nas condições de tráfego, carga aplicada, e características dos materiais, ou seja, alterando a espessura da camada marcada, de forma a atender primeiramente o critério da fadiga.

Segundo o Manual de Utilização do Programa MeDiNa (DNIT, 2020), para o cálculo da fadiga, o programa MeDiNa utiliza o estado de tensões em dez pontos na superfície, espaçados por 3,65 cm, além de mais dez pontos na fibra inferior da última camada asfáltica. O dano de fadiga é então determinado em cada um desses vinte pontos, e a média desses valores é calculada. Com essa média, o MeDiNa estima a área trincada utilizando a função de transferência, empregada para

converter as medições de tensões e deformações feitas em campo em previsões sobre o desempenho do pavimento ao longo do tempo.

Em relação às misturas asfálticas, o software utiliza misturas baseadas em valores de módulo e desempenho à fadiga, categorizadas por Classes de Fadiga. Essas classes ajudam a garantir que a mistura utilizada em campo atenda aos requisitos especificados pelo projeto. Para escolher a mistura adequada, o MeDiNa utiliza o conceito de Fator de Fadiga da Mistura (FFM). Cada mistura asfáltica é classificada com um valor de FFM, que reflete sua capacidade de resistir à fadiga. Esse fator, quando comparado com o módulo de resiliência (MR), determina a Classe de Fadiga da mistura. O MR e o FFM são avaliados conjuntamente, pois ambos influenciam na qualidade do material e performance do pavimento. Avaliar apenas um parâmetro não fornece uma visão completa da eficácia da mistura asfáltica (DNIT, 2020). Quanto maior a classe de fadiga (as classes vão de 1 até 4), melhor é o comportamento mecânico da mistura asfáltica (Knabben e Carpio, 2020).

Enquanto os materiais granulares, solos finos, siltosos ou argilosos e subleitos, não são avaliados quanto ao dano por fadiga.

d) Base de dados de Materiais

Segundo Manual de Utilização do Programa MeDiNa (DNIT, 2020), o software MeDiNa possui uma base de dados incorporada com informações sobre materiais testados e documentados em publicações técnicas. As propriedades desses materiais são fixas e não podem ser alteradas, exceto pela espessura e pelo tipo de módulo (elástico linear ou não linear), quando disponível. As propriedades dos materiais determinam a forma como o programa MeDiNa realiza as análises e dimensionamentos. Portanto, os materiais são categorizados em grupos, conforme descrito a seguir, na Tabela 05:

Tabela 05 - Base de Dados dos Grupos de Materiais

Descrição dos Materiais
Concreto Asfáltico
Concreto Asfáltico Modificado
Concreto Asfáltico Borracha
Concreto Compactado a Rolo (CCR)
Tratamento Superficial
Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)
Solo Cimento
Solo-Cal
Material Granular
Solo fino, siltoso ou Argiloso
Subleito

Fonte: Autores (2025).

Cada grupo apresenta opções de materiais, já ensaiados ou preparados, incluindo as suas respectivas propriedades intrínsecas, para serem utilizados no programa.

2.2.2.1.2 Análises e Critérios de Aceitação

No dimensionamento mecanístico-empírico são utilizados indicadores de desempenho em função dos principais defeitos encontrados nos pavimentos: trincamento do revestimento por fadiga e afundamentos por trilha de rodas. Motta (1991) diz que as deformações referentes na trilha de rodas são provenientes de todos os materiais presentes na estrutura do pavimento, visto que estudos mostram que existem valores admissíveis que não prejudicam a segurança, podendo estar entre 10 mm e 20 mm – admite-se 13 mm para pavimentos com alto volume de tráfego.

Sousa (2021), propõe que a confiabilidade é a probabilidade de um sistema estrutural desempenhar com satisfação a função que se destina e com o tempo estabelecido. Dessa maneira pode ser expressa como:

$$C = P[(R - \sigma) \geq 0] \quad (\text{Eq. 06})$$

Onde:

P - Probabilidade em função de R e σ ;

R - Tensão resistente;

σ - Tensão de ruptura

Quando R for menor que σ ocorre uma ruptura. A escolha do grau de confiabilidade depende do risco aceitável de deterioração do pavimento durante o prazo de vida do projeto. A tabela 06 demonstra os critérios e a confiabilidade de cada tipo de via.

Tabela 06 - Indicadores de Desempenho

Tipo de Via	Confiabilidade	Área Trincada	Deformação Permanente
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10 mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Local	65%	30%	20 mm

Fonte: Franco (2018).

Após o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos, o software avalia se o número de aplicações de carga resultará em trincamento excessivo do revestimento asfáltico ou das camadas cimentadas, ou em afundamento na trilha de roda que exceda o limite estabelecido (Knabben e Carpio, 2020).

a) Afundamento de Trilha de Roda - Deformação Permanente

Para garantir a estabilidade e o desempenho adequado de um pavimento, é essencial conhecer detalhadamente o subleito e os materiais utilizados nas camadas do pavimento. O subleito deve ser conhecido através de ensaios laboratoriais que

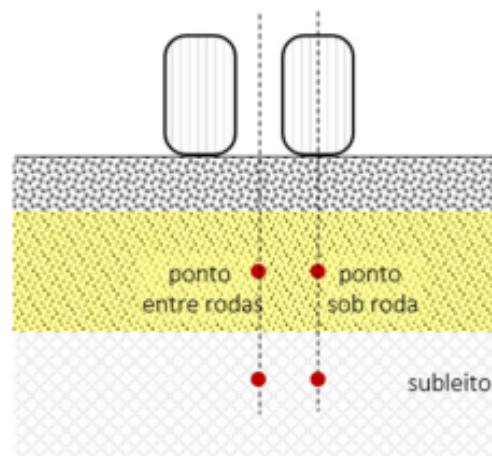
determinam o módulo de resiliência e a curva de deformação permanente. Esses dados ajudam a entender como o subleito se comporta sob carga e suas propriedades de deformação (DNIT, 2020).

Além do subleito, os materiais naturais utilizados nas camadas de base, sub-base e reforço também precisam ser bem caracterizados. Isso inclui materiais provenientes de jazidas, pedreiras e areais. Esses ensaios laboratoriais devem ser realizados para obter informações precisas sobre o módulo e a deformação permanente desses materiais (DNIT, 2020).

Portanto a análise da estrutura é realizada a partir do cálculo das tensões, deformações e deslocamentos do sistema de camadas em relação ao carregamento aplicado, e de acordo com as características dos materiais empregados, que deverão ser obtidas de forma experimental mediante ensaios de laboratório (Knabben e Carpio, 2020).

De acordo com o Manual de Utilização do Programa MeDiNa (DNIT, 2020), o programa MeDiNa utiliza o estado de tensões calculado nos pontos sob a roda e entre as rodas, no centro das camadas, conforme ilustrado na figura 14 abaixo:

Figura 14 – Estado de tensões



Fonte: DNIT (2020).

A deformação permanente calculada para cada camada é somada para compor a deformação permanente total utilizada no dimensionamento (DNIT, 2020).

Logo o programa realiza o dimensionamento verificando conforme o critério de deformação permanente total. Se esse critério não for atendido, o software ajusta

gradualmente a espessura da camada identificada, aumentando-a em intervalos fixos (0,5 cm para camadas asfálticas e 1 cm para outras camadas), até que o critério seja cumprido (DNIT, 2020). Além disso, é emitido um alerta quando a deformação permanente de cada camada individual ultrapassar 5% de sua espessura e a camada do subleito ultrapassar 5mm.

Ao final do dimensionamento, o programa fornece um resumo que o projetista pode revisar. Essa funcionalidade ajuda na seleção dos materiais e oferece uma compreensão mais detalhada da estrutura do projeto em relação ao ATR.

b) Área Trincada

Neste caso, o programa analisa, com base no cálculo das tensões, deformações e deslocamentos das camadas em resposta ao carregamento aplicado, considerando as características dos materiais empregados, incluindo o coeficiente de fadiga, classes de fadiga e outros parâmetros previamente mencionados. De forma que assim que realizadas as diversas análises e cálculos, alterando-se a espessura da camada, atenda-se primeiramente o critério da fadiga. Nesse estágio o programa irá aumentar ou diminuir as espessuras para localizar a melhor espessura para o máximo permitido de Área Trincada (DNIT, 2020).

No dimensionamento, o software irá variar a espessura da camada até que os valores de Área Trincada Estimada se mantenham inferiores aos valores admissíveis de 30%, isto permitirá que materiais com menor resistência e, ao mesmo tempo, mais econômicos, possam ser utilizados na obra para atender as especificações do projeto (Knabben e Carpio, 2020), conforme ilustrado anteriormente na Tabela 06.

2.3 Revisão de Trabalhos Acadêmicos Correlatos

Nesta seção, será realizada uma análise dos resultados obtidos em trabalhos acadêmicos anteriores, como Trabalhos de Conclusão de Curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado, que abordam o mesmo tema deste estudo. A revisão desses trabalhos permite compreender as metodologias utilizadas, os resultados encontrados e as conclusões alcançadas, possibilitando uma visão comparativa e crítica sobre as contribuições que foram feitas na área até o

momento. Dessa forma, é possível identificar lacunas, validar abordagens e comparar dados relevantes para o desenvolvimento deste projeto.

A Tabela 07 organiza os materiais consultados, de acordo com a metodologia utilizada, resultados obtidos e as principais conclusões dos autores:

Tabela 07 - Resumo de trabalhos anteriores

Autor	Título	Tipo de Pesquisa	Objetivo	Resultados	Conclusões
Souza Júnior (2018)	Aplicação do Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos a Trechos de uma Rodovia Federal	Dissertação de Mestrado	Avaliar a vida útil de soluções de reforço e reconstrução de pavimentos flexíveis e semi-rígidos, aplicando o método mecanístico-empírico MeDiNa, e comparando com o Catálogo de Soluções do DNIT.	Em 78% dos casos, as soluções indicadas pelo Catálogo do DNIT não atingiram a vida útil de 10 anos, e 84% apresentaram problemas em até 4 anos. Algumas rupturas ocorreram em menos de 1 ano.	Os resultados mostram a importância de considerar as características elásticas dos materiais frente ao tráfego e clima. O método MeDiNa apresentou maior precisão ao lidar com essas variáveis, em comparação com os métodos empíricos tradicionais do DNER.
Costa (2021)	Avaliação da Implantação do Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis pelo Método MeDiNa no Contexto Brasileiro.	Trabalho de Conclusão de Curso	Comparar o método de dimensionamento MeDiNa com os métodos empíricos tradicionais do DNER para avaliar a implantação no Brasil.	O método MeDiNa apresentou desempenho superior ao dos métodos empíricos, com menor taxa de falhas.	O método MeDiNa é mais eficaz em termos de durabilidade e desempenho, embora a falta de ensaios laboratoriais dos materiais ainda seja uma barreira para sua implantação total
Gouveia (2022)	Comparação entre pavimentos dimensionados com os métodos do DNER (1981) e MeDiNa (2018): Estudo de caso com solos de subleito da cidade de João Pessoa/PB	Trabalho de Conclusão de Curso	Apresentar uma análise comparativa entre estruturas de pavimentos flexíveis dimensionadas pelos métodos DNER (1981) e MeDiNa (2018), utilizando dois tipos de solos da cidade de João Pessoa, Paraíba.	As estruturas projetadas pelo método DNER apresentaram ineficiências quanto ao trincamento por fadiga e deformação permanente, enquanto as projetadas pelo MeDiNa (2018) demonstraram um desempenho satisfatório, dentro dos limites estabelecidos.	O método de dimensionamento MeDiNa se mostrou mais eficiente para atender às necessidades dos pavimentos, em comparação com o método DNER, que, apesar de sua importância histórica, está ultrapassado diante das novas demandas de tráfego e tecnologia
Gracioli (2022)	Dimensionamento de diferentes estruturas de pavimentos submetidas a quatro solicitações de tráfego: análise pelos métodos do DNER e MeDiNa, considerando o desempenho e os custos por solicitação	Trabalho de Conclusão de Curso	Analisar o desempenho de diferentes estruturas de pavimentos submetidas a quatro níveis de tráfego, comparando os métodos de dimensionamento DNER (1981) e MeDiNa, com foco em desempenho técnico e custo.	Verificou-se que o método MeDiNa proporciona pavimentos mais eficientes e com menor custo ao longo da vida útil do pavimento, além de possibilitar maior flexibilidade na escolha e substituição de materiais.	O método MeDiNa, quando comparado ao DNER, oferece maior eficiência e economia, permitindo melhor análise de materiais e desempenho das camadas do pavimento, o que facilita o trabalho do projetista e otimiza os custos

Pizutti (2023)	Análise Comparativa da Vida Útil de Projeto entre Metodologias Empírica, Semi-Empírica e Empírico-Mecanicista de Dimensionamento de Pavimentos	Artigo (DOI: 10.29327/1304307.48-15) - 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)	Analisar a eficácia de diferentes métodos de dimensionamento de pavimentos quanto à sua vida útil. Comparação do método DNER com modelos de ruína consagrados na literatura, para avaliar o comportamento de deslocamento vertical, deformação à tração e compressão.	Para tráfegos leves, o método DNER atende às demandas estruturais, apresentando até mesmo superdimensionamento. No entanto, para tráfegos pesados, é necessário utilizar análises empírico-mecanicistas, pois o método DNER sozinho não garantiria a vida útil desejada. O estudo ainda identificou o ponto de corte em que o método semi-empírico permanece eficaz para cargas até N de $1,5 \times 10^6$.	O método DNER pode ser eficiente para tráfegos mais leves, mas para volumes de tráfego maiores, é recomendável aplicar métodos mais robustos, como o empírico-mecanicista, para evitar falhas prematuras. Para tráfegos elevados, uma análise complementar pelo método empírico-mecanicista e o uso de pavimentos com maior resistência estrutural são recomendados, proporcionando maior segurança para o projeto e prolongando a vida útil do pavimento
----------------	--	--	---	--	---

Fonte: Autores (2025).

A tabela comparativa sobre trabalhos anteriores oferece uma visão clara sobre como o método MeDiNa tem sido comparado aos métodos tradicionais de dimensionamento de pavimentos, como o do DNER/81. A partir dos dados analisados, é evidente que o MeDiNa tem se mostrado mais eficaz em termos de desempenho e durabilidade em diversas condições de tráfego e clima, o que confirma sua relevância técnica para a pavimentação no Brasil. Essa consistência nos resultados reforça a validade do método, destacando a importância de adotá-lo de maneira mais ampla nas rodovias nacionais.

Os trabalhos de Souza Júnior (2018) e Gouveia (2022), por exemplo, apontam falhas importantes no método DNER/81, como o trincamento por fadiga e a deformação permanente, o que evidencia a necessidade de atualização nas práticas de dimensionamento. O MeDiNa, por sua vez, apresentou maior precisão ao considerar variáveis como as características elásticas dos materiais e as condições climáticas, algo que os métodos empíricos tradicionais não conseguem abordar adequadamente. Dessa forma, fica claro que o MeDiNa oferece uma solução mais moderna e adaptada aos desafios enfrentados pelas rodovias brasileiras.

Outro aspecto recorrente nos trabalhos é a eficiência de custo do MeDiNa. Conforme destacado por Gracioli (2022) e Costa (2021), além de melhorar o desempenho técnico, o método possibilita uma economia significativa a longo prazo. No entanto, um ponto que merece atenção é que esses estudos não exploram suficientemente os desafios de custo inicial e implementação do método.

Além disso, percebe-se que os estudos de caso se concentram em regiões e condições específicas, como João Pessoa no trabalho de Gouveia (2022). Essa limitação geográfica abre espaço para que seja explorada a aplicação do MeDiNa em diferentes regiões do Brasil, considerando as variações de solo, clima e tráfego.

O estudo de Costa (2021) levanta uma questão sobre a falta de ensaios laboratoriais suficientes para os materiais, o que ainda é uma barreira para a plena adoção do MeDiNa no Brasil.

Por fim, Pizutti (2023) traz o comparativo de vida útil de pavimentos pré-dimensionados pelo método DNER/81 e pela análise empírico-mecanística, e conclui que para valores de tráfego (N) relativamente baixos ($N < 1,5 \times 10^6$), o método DNER/81 garante a segurança quanto à vida útil do projeto ao superdimensionar a estrutura do pavimento. Já para maiores volumes de tráfego ($N > 1,5 \times 10^6$), a estrutura dimensionada pelo método DNER/81 entra em ruína antes do período de 10 anos. A autora salienta que uma das principais diferenças entre os métodos é a caracterização dos materiais: enquanto o método DNER/81 adota o mesmo valor de coeficiente estrutural para materiais granulares ($k=1$), seja BGS, bica corrida ou até mesmo macadame seco, o método empírico-mecanístico considera o módulo de resiliência, distinto para cada material. É destacada ainda a importância de se utilizar mais de um método ao dimensionar pavimentos para altos volumes de tráfego.

Os resultados obtidos nestes trabalhos, apontam falhas identificadas no método DNER/81, melhorias trazidas pelo método MeDiNa em termos de custo e adaptação a diferentes regiões e condições climáticas, e também a necessidade de mais ensaios para caracterização dos materiais. O software MeDiNa e a relação entre a vida útil do pavimento e o volume de tráfego, oferecem uma base de informações essenciais para o desenvolvimento da pesquisa proposta, principalmente, para a eficácia dos dimensionamentos dos pavimentos em estudo.

Nesse contexto, a abordagem proposta para o trabalho, que busca determinar a variação dos materiais do subleito e o volume de tráfego a serem adotados, proporcionará uma compreensão mais detalhada de como esses fatores impactam o desempenho dos pavimentos. Através de uma exemplificação prática dos métodos, com a realização dos dimensionamentos e a comparação dos resultados nas suas

variações, será possível obter uma visão mais clara sobre a aplicabilidade das metodologias em diferentes cenários, contribuindo diretamente para o aprimoramento do processo de dimensionamento de pavimentos.

3 METODOLOGIA

Com o objetivo de comparar os diferentes métodos de dimensionamento de pavimento, criam-se diferentes cenários hipotéticos, onde algumas variáveis são arbitrariamente fixadas enquanto outras são modificadas. Optou-se por trabalhar com o pavimento do tipo flexível, variando os valores de CBR da camada do subleito e da intensidade de tráfego. Além disso, no método MeDiNa, serão utilizadas duas classes distintas de revestimento.

3.1 Estruturação do método

O Método DNER/81 baseia-se no uso de ábacos que correlacionam o tráfego de projeto, a capacidade de suporte do subleito (expressa pelo CBR) e a espessura das camadas do pavimento. O princípio fundamental desse método é que, quanto menor a capacidade de suporte do subleito (CBR mais baixo), maior deve ser a espessura das camadas para garantir o desempenho adequado da estrutura do pavimento ao longo do tempo. Por este motivo, o DNIT estabelece um CBR mínimo de 2% para o dimensionamento, pois valores inferiores indicariam um solo extremamente fraco, inadequado para suportar cargas provenientes do tráfego (DNIT, 2006).

Portanto são determinadas duas situações em que o material do subleito apresenta um valor de CBR distinto em cada uma delas:

- CBR = 7% - Representa uma capacidade de suporte baixa, dentro dos limites estabelecidos, adequada para garantir a estabilidade estrutural do pavimento e atender a condições de tráfego leve a moderado com segurança;
- CBR = 12% - Valor com capacidade de suporte alta, desejável para reduzir espessuras de camadas e em altos volumes de tráfego.

Nas camadas de base e sub-base será utilizado como material padrão a brita graduada, com espessuras iniciais de 15 cm, que é o valor mínimo estabelecido pelo DNIT para pavimentos flexíveis. A granulometria do material será a mesma em todos os cenários.

Na camada de base foi definido como material granular, por padrão, o material disponibilizado na biblioteca do MeDiNa: Brita Graduada - Gnaisse C5, com massa específica de $2,223 \text{ g/cm}^3$; umidade ótima de 5,0 % e módulo de resiliência de 381 MPa.

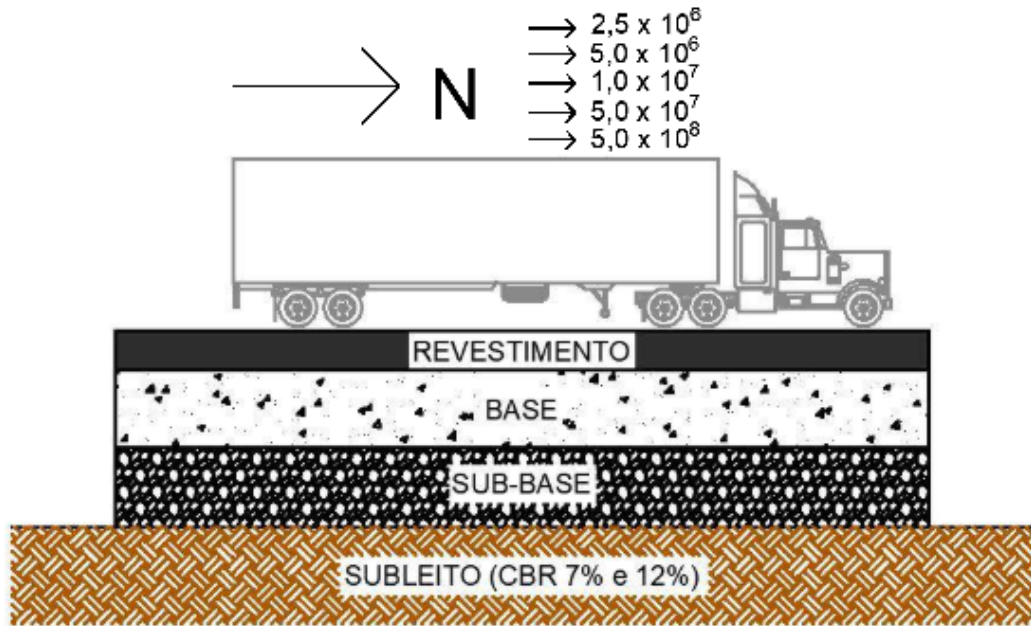
Da mesma forma é determinada na camada de sub-base granular a Brita Graduada - Gnaisse C1, com massa específica de $2,268 \text{ g/cm}^3$; umidade ótima de 5,8 % e módulo de resiliência de 259 MPa.

Adicionalmente serão definidas cinco diferentes intensidades de volume de tráfego, com variação do número N para cada variante do material adotado para o subleito, como critério, os autores buscaram utilizar valores que permitissem variar a espessura do revestimento pelo método DNER/81:

- $N = 2,5 \times 10^6$ - Considerado um baixo volume de tráfego, também é o valor a partir do qual já não se utiliza um tratamento superficial para revestimento e sim uma camada de concreto asfáltico com espessura mínima de 5,0 cm, considerando o método DNER/81;
- $N = 5 \times 10^6$ - Considerado um baixo volume de tráfego, ligeiramente acima do valor anterior e valor limite de N para espessura mínima de 5,0 cm;
- $N = 1 \times 10^7$ - Valor intermediário entre um tráfego considerado de baixo volume e outro de alto volume, também é o valor limite de N para um revestimento mínimo com 7,5 cm de espessura;
- $N = 5 \times 10^7$ - Valor limite para um volume de tráfego no qual já se faz necessário a utilização de uma camada de revestimento com no mínimo 10,0 cm de espessura;
- $N = 5 \times 10^8$ - Considerado alto volume de tráfego, já se recomenda pelo método DNIT, uma espessura mínima de revestimento de 12,5 cm.

A figura 15 exemplifica a estrutura em camadas do pavimento, e representa a variação da intensidade do tráfego (N) e variação do CBR do subleito:

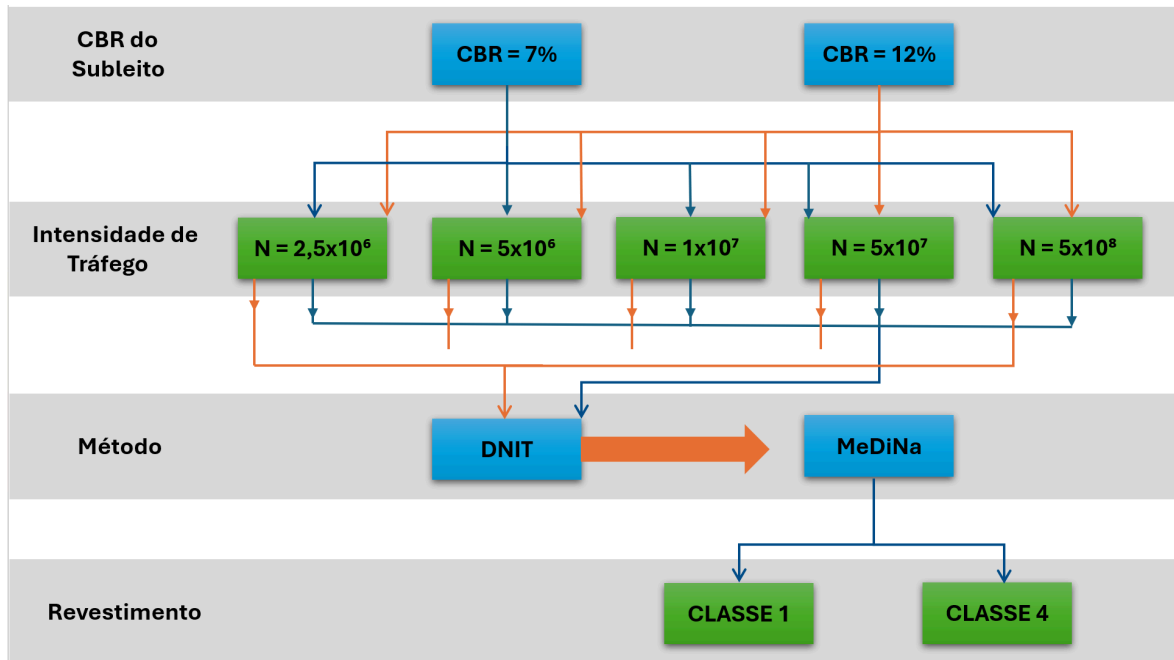
Figura 15 – Estrutura do pavimento com variações de “N” e “CBR”



Fonte: Autores (2025).

Os diferentes cenários para dimensionamento são ilustrados no esquema a seguir (Fig.16), onde são representadas as diferentes combinações geradas pela variação do CBR, intensidade de tráfego, e classe de revestimento.

Figura 16 – Esquema representativo dos dimensionamentos



Fonte: Autores (2025).

Ao final serão geradas 10 estruturas de pavimento obtidas pelo método DNER/81, sendo:

- 2 com $N = 2,5 \times 10^6 \rightarrow$ CBR = 7% e 12%
- 2 com $N = 5 \times 10^6 \rightarrow$ CBR = 7% e 12%
- 2 com $N = 1 \times 10^7 \rightarrow$ CBR = 7% e 12%
- 2 com $N = 5 \times 10^7 \rightarrow$ CBR = 7% e 12%
- 2 com $N = 5 \times 10^8 \rightarrow$ CBR = 7% e 12%

Após os dimensionamentos dos pavimentos pelo método DNER/81, são obtidas as espessuras de camadas de revestimento, base e sub-base. Nas verificações pelo método MeDiNa, são fixadas estas mesmas espessuras de base e sub-base, obtidas previamente pelo método DNER/81, limitando a única variável entre os métodos a espessura da camada de revestimento.

Na avaliação pelo MeDiNa, além das análises anteriores, foram incluídas situações relacionadas à resistência à fadiga. Os dimensionamentos foram feitos considerando revestimentos asfálticos com baixa (Classe 1) e alta resistência à fadiga (Classe 4). Ao todo serão 20 verificações pelo método MeDiNa:

- 2 com $N = 2,5 \times 10^6 \rightarrow$ CBR = 7% e 12% - Revestimento Classe 1
- 2 com $N = 2,5 \times 10^6 \rightarrow$ CBR = 7% e 12% - Revestimento Classe 4
- 2 com $N = 5 \times 10^6 \rightarrow$ CBR = 7% e 12% - Revestimento Classe 1
- 2 com $N = 5 \times 10^6 \rightarrow$ CBR = 7% e 12% - Revestimento Classe 4
- 2 com $N = 1 \times 10^7 \rightarrow$ CBR = 7% e 12% - Revestimento Classe 1
- 2 com $N = 1 \times 10^7 \rightarrow$ CBR = 7% e 12% - Revestimento Classe 4
- 2 com $N = 5 \times 10^7 \rightarrow$ CBR = 7% e 12% - Revestimento Classe 1
- 2 com $N = 5 \times 10^7 \rightarrow$ CBR = 7% e 12% - Revestimento Classe 4
- 2 com $N = 5 \times 10^8 \rightarrow$ CBR = 7% e 12% - Revestimento Classe 1
- 2 com $N = 5 \times 10^8 \rightarrow$ CBR = 7% e 12% - Revestimento Classe 4

Já na camada de subleito, onde é necessário variar as características do material, o software não permite inserir valores de CBR, apenas Módulo de Resiliência. Para tanto são utilizadas correlações obtidas entre o módulo de

resiliência do material e o valor de CBR, conforme equação publicada em *Guide for Design of Pavement Structures* (AASHTO, 1993). Também será utilizado o material na biblioteca do MeDiNa que possua maior proximidade com o valor encontrado. A Tabela 08 apresenta a correlação realizada para o Módulo de Resiliência.

$$MR = 1500 \times CBR \quad (\text{Eq. 07})$$

onde:

MR = Módulo de Resiliência (psi)

CBR (Índice de Suporte Califórnia (%))

Tabela 08 - Correlação do Módulo de Resiliência, com base na equação de AASHTO (1993)

Correlação do Módulo de Resiliência	
CBR (%)	MR (MPa)
7	72,225
12	123,813

Fonte: Autores (2025).

Com estas correlações é possível obter uma estimativa dos valores dos módulos de resiliência, no entanto, para valores mais precisos se faz necessária a realização de ensaios de laboratório, como o ensaio triaxial de cargas repetidas, orientado pela NORMA DNIT 134/2018 - ME, Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.

3.2 Exemplificação do método

A fim de demonstrar a metodologia aplicada neste trabalho, serão apresentados dois exemplos de como serão realizados os dimensionamentos dos pavimentos.

Inicialmente são dimensionados os pavimentos pelo método DNER/81, com seus critérios exibidos na Tabela 09:

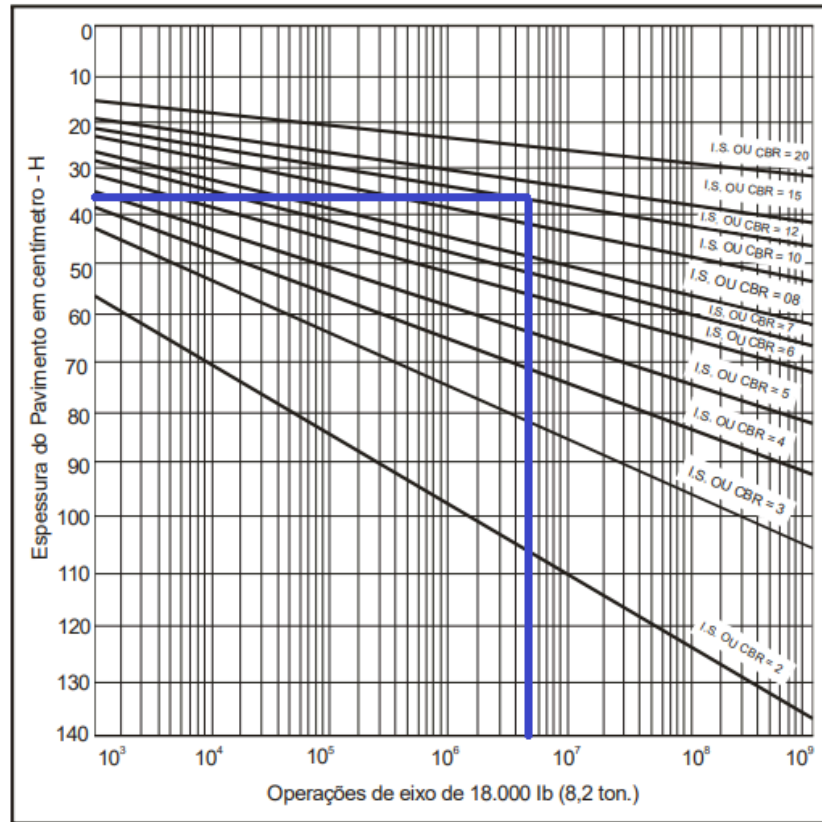
Tabela 09 - Dados de Tráfego

Dados de tráfego	
Período de Projeto	10 anos
CBR do Subleito	12%
N	5×10^6
Pavimento	Flexível
Revestimento CBUQ	K = 2,00
Base Granular	K = 1 ; CBR = 80%
Sub-Base Granular	K = 1 ; CBR = 20%

Fonte: Autores (2025).

Ao entrar com o valor de N no ábaco, é obtida a espessura total do pavimento, neste caso, 37 cm (Fig. 17).

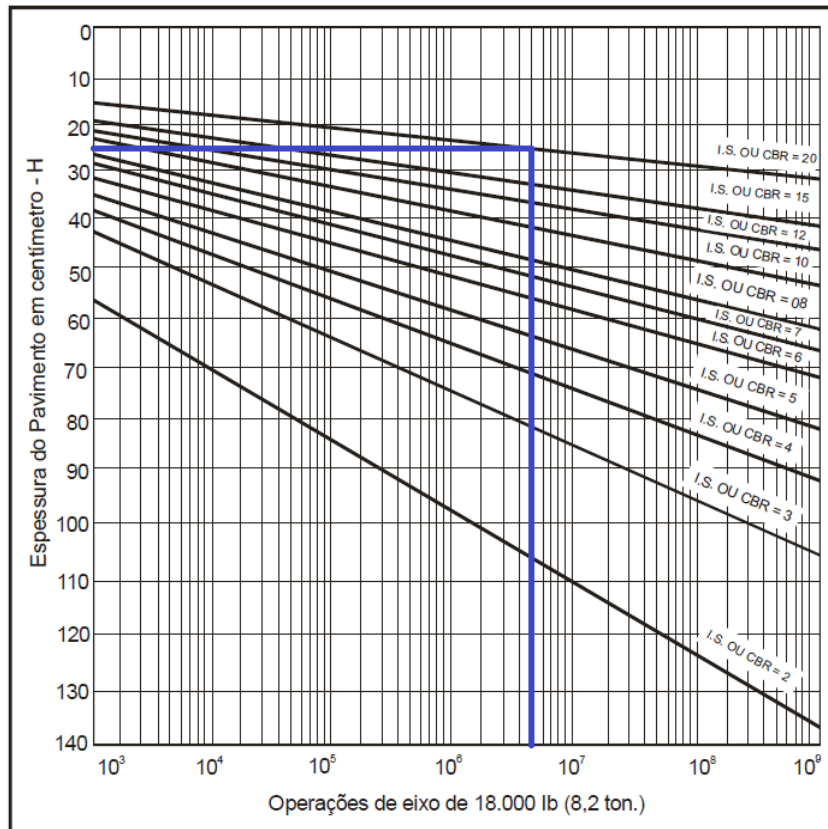
Figura 17 - Espessura Total do Pavimento



Fonte: Autores (2025).

Analogamente, é encontrada a espessura que protege a sub-base (base + revestimento) com CBR = 20%. O valor obtido é de 28 cm (Fig.18).

Figura 18 – Espessura acima da sub-base



Fonte: Autores (2025).

A partir da Tabela 04, como $N > 5 \times 10^6$, o revestimento mínimo é determinado como sendo igual a 5,0 cm para revestimento betuminoso (tratamento superficial ou concreto asfáltico). Com estes dados em mão é possível obter a espessura da base, com a inequação 01:

$$R \times Kr + B \times Kb \geq H_{20}$$

$$R = 5 \text{ cm}$$

$$H_{20} = 28 \text{ cm}$$

$$Kr = 2,00$$

$$Kb = 1,00$$

Substituindo:

$$5 \times 2 + B \times 1 \geq 28$$

$$B \geq 18 \text{ cm}$$

O valor encontrado é de 18 cm, o que atende ao requisito da espessura mínima recomendada para a camada de base (15cm). A partir desta informação, é determinada a espessura real da camada de sub-base, com a inequação 02:

$$R \times Kr + B \times Kb + h_{20} \times Ks \geq H_n$$

$$5 \times 2 + 18 \times 1 + h_{20} \times 1 \geq 37$$

$$h_{20} \geq 09$$

No entanto, o valor mínimo para a sub-base é de 15 cm.

As espessuras finais de cada camada, são expostas abaixo:

- Revestimento = 5 cm
- Base = 18 cm
- Sub-base = 15 cm
- Espessura real total = 38 cm

O segundo passo consiste no dimensionamento dos pavimentos utilizando o método MeDiNa, com o auxílio do software MeDiNa, serão utilizados os mesmos parâmetros definidos para o método DNER/81. Adicionalmente serão adotadas duas classes de revestimento para cada estrutura, com distintos módulos de resiliência, a fim de avaliar sua influência nos resultados finais:

- Concreto asfáltico Classe 1 - MR = 5.764 MPa
- Concreto asfáltico Classe 4 - MR = 10.492 MPa

Esse procedimento requer a inserção de dados específicos, que são detalhados na tabela 10, abaixo.

Tabela 10 - Dados do Tráfego - MeDiNa

Dados de Tráfego	
Tipo de Via	Sistema Arterial Secundário
Período de Projeto	10 anos
N Total	5×10^6

Pavimento	Flexível
Revestimento CBUQ	Mr = 5.764 MPa - Classe 1
Base Granular	Brita Graduada Gnaisse C5 Mr = 381 MPa
Sub-Base Granular	Brita Graduada Gnaisse C1 Mr = 259 MPa
Subleito	Solo Siltoso NS` Mr = 123,81 MPa (Correlacionado)

Fonte: Autores (2025).

Na ausência de valores experimentais de MR, inicialmente serão utilizados os valores fornecidos na biblioteca do software MeDiNa, que mais se aproximam aos valores equivalentes em CBR, de acordo com a equação 07. Contudo, no decorrer das simulações, pode ser necessário consultar outros dados na bibliografia para obter informações adicionais, devido às limitações dos materiais disponibilizados pelo software.

A espessura das camadas de sub-base e base são inicialmente definidas pelos valores mínimos de 15 cm de espessura, inicia-se então a análise da estrutura pelo software, que por sua vez informa a espessura necessária para camada de revestimento asfáltico, em que os indicadores de desempenho devem atender aos limites impostos pela Tabela 06, exibida anteriormente.

A seguinte estrutura de pavimento é obtida como resultado, exibido na figura 19:

Figura 19 – Exemplo de estrutura do pavimento flexível obtida pelo dimensionamento MeDiNa

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO Classe 1	9,3	Resiliente Linear MR = 5764 MPa	0,30
2	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5	18,0	Resiliente Linear MR = 381 MPa	0,35
3	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1	15,0	Resiliente Linear MR = 259 MPa	0,35
4	SUBLEITO Solo CBR EQUIV. 12%	SL	Resiliente Linear MR = 124 MPa	0,45

Fonte: Autores (2025).

O software também informa os resultados que devem obedecer aos critérios da Tabela 06:

- Nível de confiabilidade da análise: 75%;
- Área trincada do pavimento no fim do período: 29,9%;
- Afundamento de trilha de roda: 3,9 mm.

Por fim, haverá diversas estruturas de pavimentos com diferentes espessuras de revestimento asfáltico, obtidas para diferentes condicionantes e diferentes métodos.

A metodologia deste trabalho consiste em realizar o dimensionamento de diversas estruturas de pavimento, com variações de tráfego, CBR do subleito pelo método DNER/81, comparando com os valores de revestimento obtidos pelas análises do MeDiNa, para revestimentos com capacidades estruturais distintas. Esse estudo será conduzido considerando as cinco variações no número N e duas variações no valor de CBR do subleito, aplicados aos dois métodos exemplificados acima. Ao comparar os resultados obtidos com cada combinação de variáveis e métodos, busca-se obter a influência que os dados de entrada do projeto (CBR do subleito, volume de tráfego e classe de revestimento) exercem nos diferentes métodos utilizados, na obtenção da espessura final do revestimento. Os valores encontrados são exibidos em forma de tabela e gráficos de barras.

Ao avaliar o impacto causado por cada variação na espessura final de cada camada, é possível obter uma visão abrangente sobre a aplicabilidade de cada método no contexto das rodovias brasileiras.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e analisados os dados obtidos a partir das metodologias empregadas no dimensionamento dos pavimentos flexíveis, considerando a variação das condições do subleito, do volume de tráfego e do tipo de revestimento utilizado.

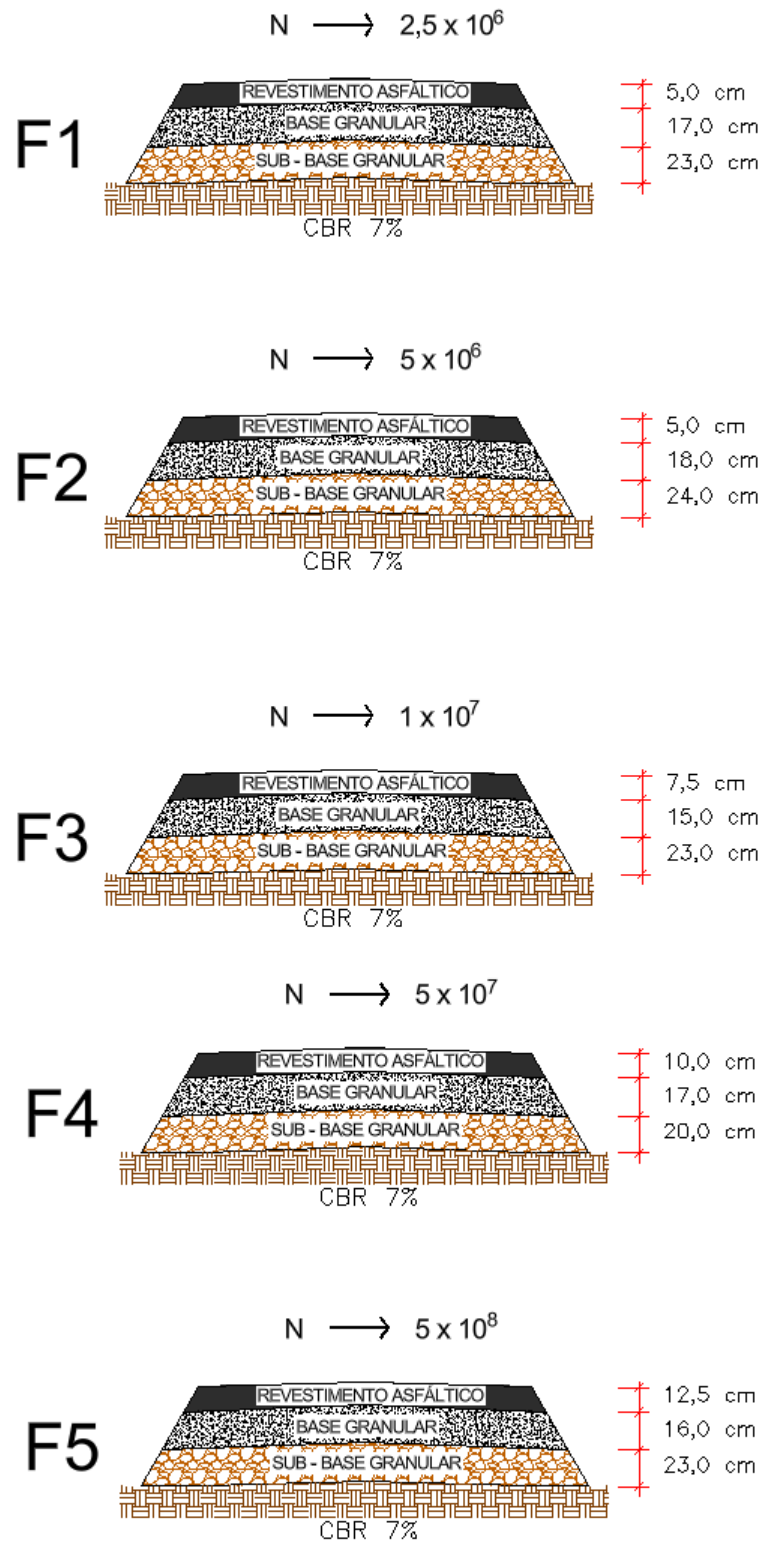
4.1 Resultados

Inicialmente, foram dimensionadas as camadas dos pavimentos flexíveis para as condições de subleito com CBR de 7% e 12%, utilizando o método do DNER/81. Parte desse dimensionamento foi exemplificada no capítulo de metodologia aplicada.

Vale ressaltar que não foram feitos arredondamentos dos valores obtidos, tampouco foram ajustados para se obter camadas com espessuras que viabilizem a execução, pois a intenção dos autores é avaliar os valores brutos que cada método recomenda. Por exemplo, se encontrada uma espessura de cálculo de 9,7 cm para alguma camada, esse valor será utilizado para comparação; num cenário prático, esse valor seria arredondado para 10 cm, facilitando a execução da obra e com atuação em favor da segurança.

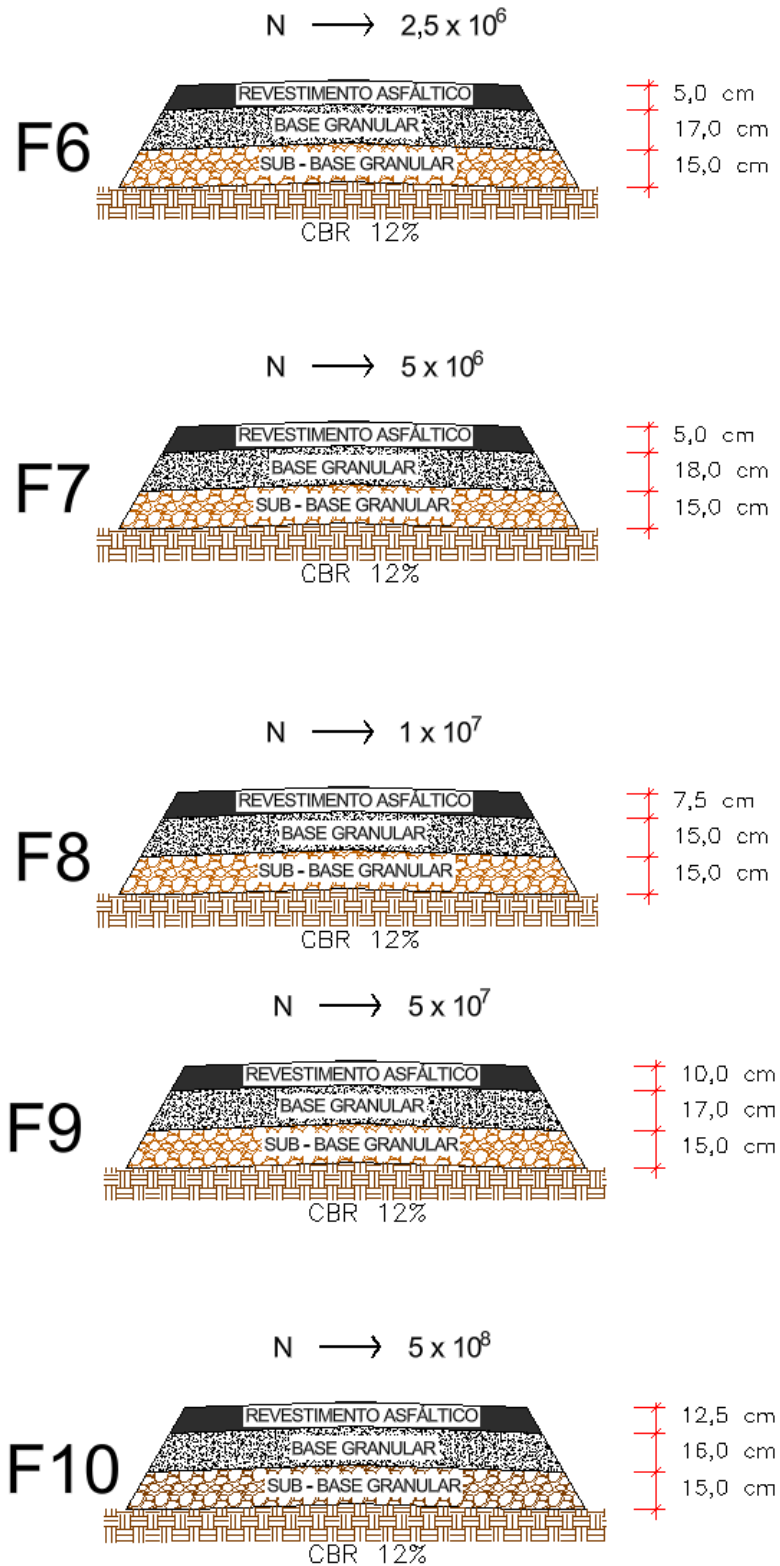
A Figura 20 apresenta os resultados do dimensionamento para CBR igual a 7%, onde cada variação de tráfego recebeu uma denominação específica, desde F1 para o menor tráfego ($N = 2,5 \times 10^6$) até F5 para o tráfego mais elevado. Da mesma forma, a Figura 21 exhibe os resultados para CBR igual a 12%, seguindo o mesmo princípio de nomenclatura, variando de F6 à F10.

Figura 20 – Estrutura do pavimento flexível obtida pelo Método DNER/81 com CBR 7%



Fonte: Autores (2025).

Figura 21 – Estrutura do pavimento flexível obtida pelo Método DNER/81 com CBR 12%



Fonte: Autores (2025).

Nas análises realizadas com o MeDiNa, são utilizadas as mesmas espessuras de camadas de base e sub-base, com seus parâmetros mencionados na Tabela 10; para o CBR do subleito, foi utilizada a correlação expressa na Tabela 08. O objetivo é garantir que a estrutura projetada atenda à vida útil prevista para o pavimento, considerando diferentes níveis de tráfego. Os resultados exibem as espessuras obtidas para os revestimentos de Classe 1 e Classe 4, permitindo uma análise comparativa entre as soluções adotadas para cada cenário de tráfego.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados de espessura de revestimento obtidas para os pavimentos flexíveis (F1 a F5) e para um subleito com CBR de 7%.

Tabela 11 - Revestimento obtido para os pavimentos flexíveis para subleito com CBR de 7%

Pavimento Flexível - CBR 7% - Espessuras Dimensionadas (cm)				
Pavimento	N	Método DNIT (cm)	MeDiNa - Classe 1 (cm)	MeDiNa - Classe 4 (cm)
F1	$2,5 \times 10^6$	5	5	5
F2	5×10^6	5	10,4	5
F3	1×10^7	7,5	18	9,6
F4	5×10^7	10	28,4	22,9
F5	5×10^8	12,5	44,1	28,8

Fonte: Autores (2025).

Os resultados obtidos para baixo volume de tráfego (F1), pelos dois métodos são idênticos, o que não justifica investimentos em um revestimento de Classe 4 e adoção do método MeDiNa para dimensionamento, que exige um preparo mais rigoroso dos materiais a serem utilizados, como o próprio ensaio de MR.

Em volumes intermediários de tráfego (F2 e F3), o revestimento Classe 4 é praticamente metade do revestimento Classe 1, em volumes maiores também há uma diferença significativa de espessura entre as duas classes. Estes resultados podem auxiliar na justificativa de se escolher a Classe 4 visando redução de custos. Vale ressaltar que uma análise de custos de tipos de ligantes asfálticos é necessária para se obter a solução com maior viabilidade econômica.

Na Tabela 12, são expostos os valores obtidos para as mesmas condições de tráfego da tabela anterior, desta vez obtidos para um subleito com CBR de 12% (F6 à F10):

Tabela 12 - Revestimento obtido para os pavimentos flexíveis para subleito com CBR de 12%

Pavimento Flexível - CBR 12% - Espessuras Dimensionadas (cm)				
Pavimento	N	Método DNIT (cm)	MeDiNa - Classe 1 (cm)	MeDiNa - Classe 4 (cm)
F6	$2,5 \times 10^6$	5	5	5
F7	5×10^6	5	9,3	5
F8	1×10^7	7,5	16,7	8,8
F9	5×10^7	10	26,6	21,5
F10	5×10^8	12,5	41,9	27,4

Fonte: Autores (2025).

Analogamente aos resultados da Tabela 11 (CBR 7%), na Tabela 12, os padrões de resultado se repetem para baixos volumes de tráfego, onde a espessura de camada é a mesma nos três casos (5 cm), e a Classe 4 tem cerca da metade do valor da Classe 1 para F2 e F3. Para ambos os valores de CBR, em alto volume de tráfego, a diferença de espessura é significativa entre as duas classes de revestimento, esta diferença é maior ainda quando comparada ao Método DNER/81.

Nos resultados obtidos pelo Método DNER/81, as espessuras de revestimento aumentam proporcionalmente com o aumento do tráfego, pois são independentes do CBR do subleito.

Adicionalmente foram observados no software MeDiNa, os valores de área trincada do pavimento (AT) no final da vida útil, com o objetivo de verificar o desgaste do pavimento no período de projeto (vida útil de 10 anos). Conforme exibido na tabela 06, os indicadores de desempenho para o pavimento limitam "AT" em até 30%. Os resultados são apresentados na tabela 13:

Tabela 13 - Área trincada e afundamento de trilha de roda dos pavimentos flexíveis

Pavimento Flexível						
Pavimento	Tráfego (N)	CBR do Subleito	Classe 1		Classe 4	
			Revest. (cm)	Área Trincada (%)	Revest. (cm)	Área Trincada (%)
F1	2,5 x 10 ⁶	7%	5,0	18,5	5,0	6,6
F2	5 x 10 ⁶	7%	10,4	28,4	5,0	28,4
F3	1 x 10 ⁷	7%	18,0	29,4	9,6	29,9
F4	5 x 10 ⁷	7%	28,4	28,5	22,9	28,9
F5	5 x 10 ⁸	7%	44,1	28,4	28,8	28,7
F6	2,5 x 10 ⁶	12%	5,0	17,7	5,0	6,4
F7	5 x 10 ⁶	12%	9,3	29,9	5,0	14,5
F8	1 x 10 ⁷	12%	16,7	29,8	8,8	29,8
F9	5 x 10 ⁷	12%	26,6	29,7	21,5	28,8
F10	5 x 10 ⁸	12%	41,9	28,5	27,4	29,3

Fonte: Autores (2025).

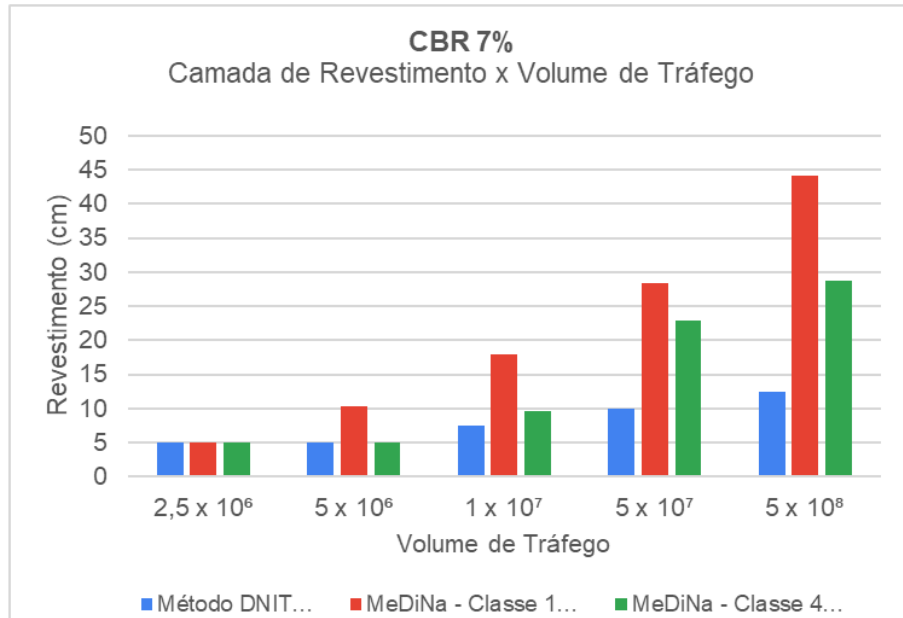
4.2 Análise e discussão dos resultados

O método DNER/81 foi utilizado para definir as espessuras das camadas de base e sub-base. Ao replicar essas espessuras no método MeDiNa, foram determinadas as camadas de revestimento necessárias para garantir a vida útil do pavimento. No entanto, as espessuras obtidas para o revestimento não correspondem às que seriam definidas pelo método mecanístico-empírico. Isso ocorre porque, nesse método, as espessuras das camadas de base e sub-base não precisam ser previamente fixadas. Em vez disso, é possível ajustá-las conforme as condições específicas do projeto, tornando os projetos não apenas tecnicamente viáveis, mas também economicamente mais eficientes.

É importante ressaltar que este trabalho aponta estruturas de pavimento com espessuras de revestimento que não necessariamente representam um dimensionamento recomendado pelo Método MeDiNa. O propósito de ter se fixado as camadas inferiores é restringir a comparação entre os pavimentos apenas ao analisar a camada de revestimento.

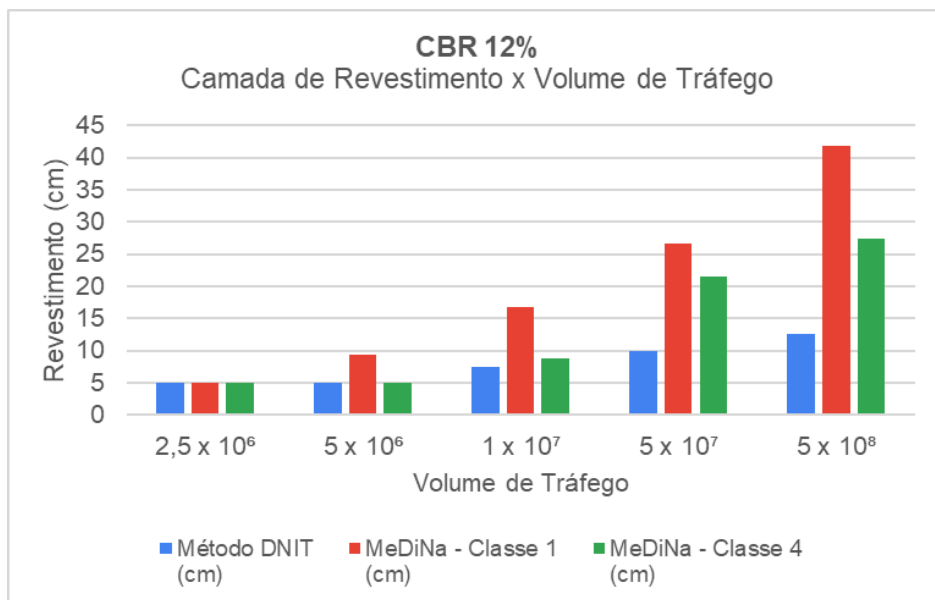
As espessuras de revestimento obtidas em todos os dimensionamentos são ilustradas nos gráficos das figuras 22 (flexível, CBR de 7%); 23 (flexível, CBR de 12%);

Figura 22 - Gráfico das espessuras de pavimentos flexíveis para subleito com CBR de 7%



Fonte: Autores (2025).

Figura 23 - Gráfico das espessuras de pavimentos flexíveis para subleito com CBR de 12%



Fonte: Autores (2025).

Inicialmente, observa-se que, para baixos volumes de tráfego ($N = 2,5 \times 10^6$), as espessuras das camadas projetadas pelo método DNER/81 mostram-se

consistentes com os valores recomendados pelo método MeDiNa, independentemente das condições dos subleitos e do tipo de revestimento considerado. Ambos os métodos adotam como referência o valor mínimo de 5 cm para a camada de revestimento em concreto asfáltico, em conformidade com cenários de menor solicitação de tráfego.

O método do DNER/81 (representado pelas colunas azuis nos gráficos 22 e 23) apresenta espessuras menores de revestimento quando comparados ao MeDiNa em praticamente todas as condições de tráfego analisadas, tanto para CBR 7% quanto para CBR 12%. Isso indica que a abordagem adotada pelo DNER/81 é menos conservadora em relação às exigências estruturais para suportar o tráfego.

Já o dimensionamento pelo software MeDiNa com revestimento Classe 1 (colunas vermelhas, gráficos 21 e 22) requer maiores espessuras na maioria dos casos, principalmente para o maior volume de tráfego, em que é percebido que a Classe 4 de revestimento acaba tendo desempenho superior. No Anexo 1, todas as estruturas dimensionadas são expostas em um único gráfico.

Ao analisar os resultados da Tabela 13, nota-se que os revestimentos com área trincada próxima de 30% indicam que a camada chega ao final da vida útil com a AT próxima do limite, enquanto aqueles com valores menores resistiram mais às fissuras no mesmo período. Nos pavimentos com Classe 1 de revestimento, apenas 2 casos apresentam área trincada com valores consideravelmente abaixo do limite: F1 e F6, enquanto com a Classe 4, esse fator se repete também em F7. Isso pode ser explicado devido ao fato de a Classe 4 possuir maior módulo de resiliência (praticamente o dobro do valor da Classe 1).

É destacado o pavimento F7, em que a Classe 4 possui cerca da metade da espessura da Classe 1, e ainda assim apresenta menos metade da AT no mesmo período, reduzindo de 29,9% para 14,5%.

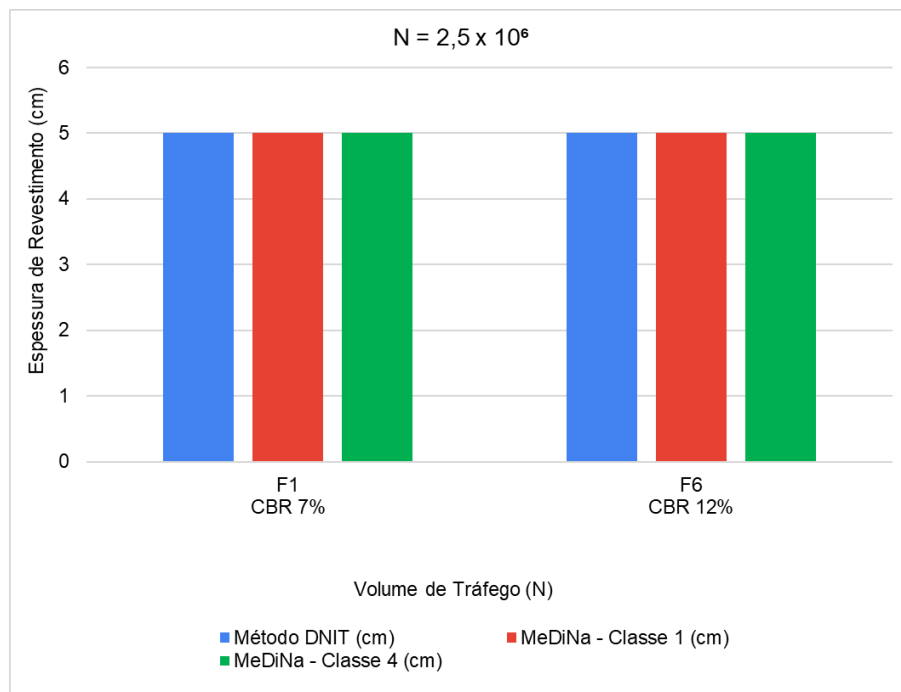
Estes resultados comprovam que o asfalto Classe 4 é superior quanto à resistência à fadiga, devido à sua relação com o Módulo de Resiliência. A adoção desse revestimento se justifica por oferecer níveis de conforto de rodagem ao usuário por maior número de anos.

Fora do escopo deste trabalho, seriam casos em que caberia a reavaliação das espessuras de camadas inferiores para se obter melhor aproveitamento do revestimento.

4.3.1 Influência do CBR no dimensionamento

Os gráficos apresentados (Fig. 22 e 23) mostram a espessura do revestimento em função do volume de tráfego e do CBR do subleito, que confrontam os resultados obtidos pelos métodos de dimensionamento do DNER/81 e do MeDiNa, considerando revestimentos de Classe 1 e Classe 4. Com objetivo de melhor compreender a influência do CBR do subleito, a análise foi dividida em cinco seções (Fig. 24, 25, 26, 27 e 28), cada uma delas representando uma intensidade de tráfego (N). Em cada gráfico são exibidas todas as espessuras obtidas para determinado “N”, variando o CBR do subleito e método de dimensionamento.

Figura 24 - Gráfico do CBR do subleito por espessuras de Revestimento para o mesmo volume de tráfego ($2,5 \times 10^6$)

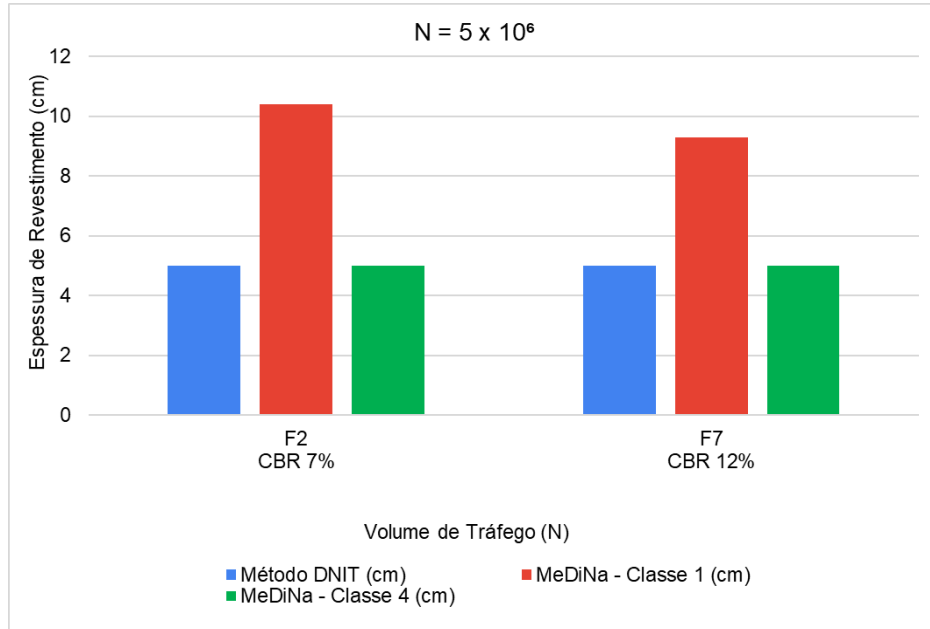


Fonte: Autores (2025).

O gráfico da figura 24 representa a espessura do revestimento necessária para um volume de tráfego de $2,5 \times 10^6$. Ao comparar F1 (CBR 7%) com F6 (CBR

12%), observa-se que a espessura do revestimento continua a mesma para os três casos (revestimento = 5 cm).

Figura 25 - Gráfico do CBR do subleito por espessuras de Revestimento para o mesmo volume de tráfego (5×10^6)

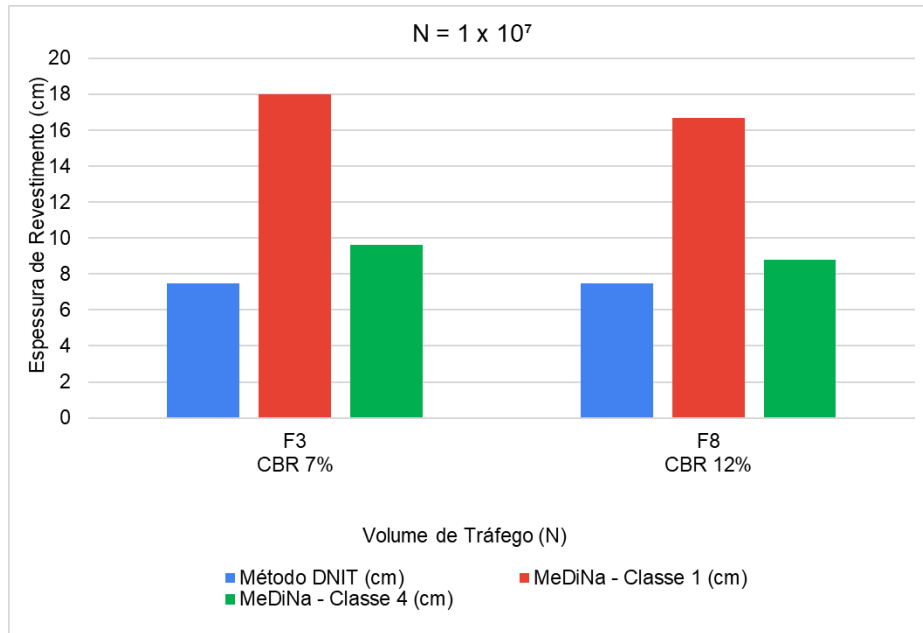


Fonte: Autores (2025).

Já para o gráfico da figura 25, o volume de tráfego dobra em relação ao apresentado na figura 24. As espessuras aumentam na maioria dos casos, como observa-se para F2, F7 e S2, sendo o dimensionamento pelo método MeDiNa, com revestimento Classe 1, os resultados que exigiram os maiores valores.

Em F2 (CBR 7%) comparado com F7 (CBR 12%), há uma baixa redução na espessura do revestimento para F7, sugerindo que a melhoria no CBR reduz pouco a espessura do revestimento, com revestimento Classe 1.

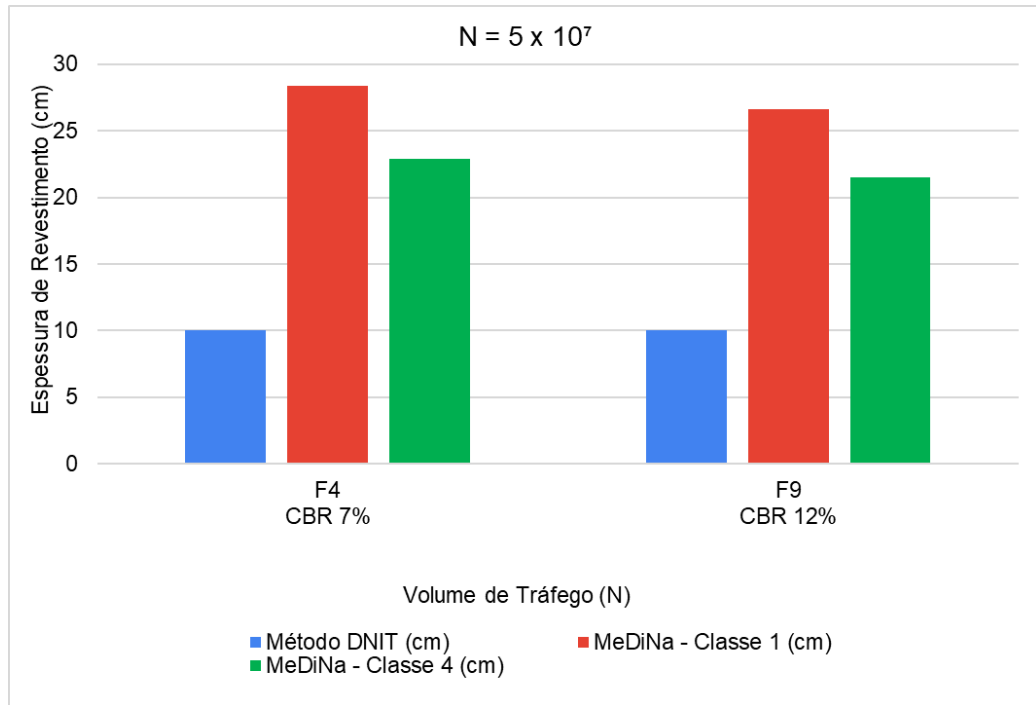
Figura 26 - Gráfico do CBR do subleito por espessuras de revestimento para o mesmo volume de tráfego (1×10^7)



Fonte: Autores (2025).

No gráfico da figura 26, a redução da espessura é notada em todas as situações, porém, novamente, apenas o MeDiNa Classe 1 tem diferença expressiva. Outro fator relevante a ser observado, é a grande diferença que o MeDiNa (Classe 1) sugere para volumes de tráfego maiores em relação ao método DNER/81, uma diferença de 240% para F3, e 222% para F8, fator que corrobora com os resultados encontrados na bibliografia, em que altos volumes de tráfego requerem a adoção de mais de um método de dimensionamento para o projeto de pavimentos. Tais resultados também chegaram à conclusão de que o Método DNER/81 acaba subdimensionado o pavimento em altos volumes de tráfego.

Figura 27 - Gráfico do CBR do subleito por espessuras de Revestimento para o mesmo volume de tráfego (5×10^7)

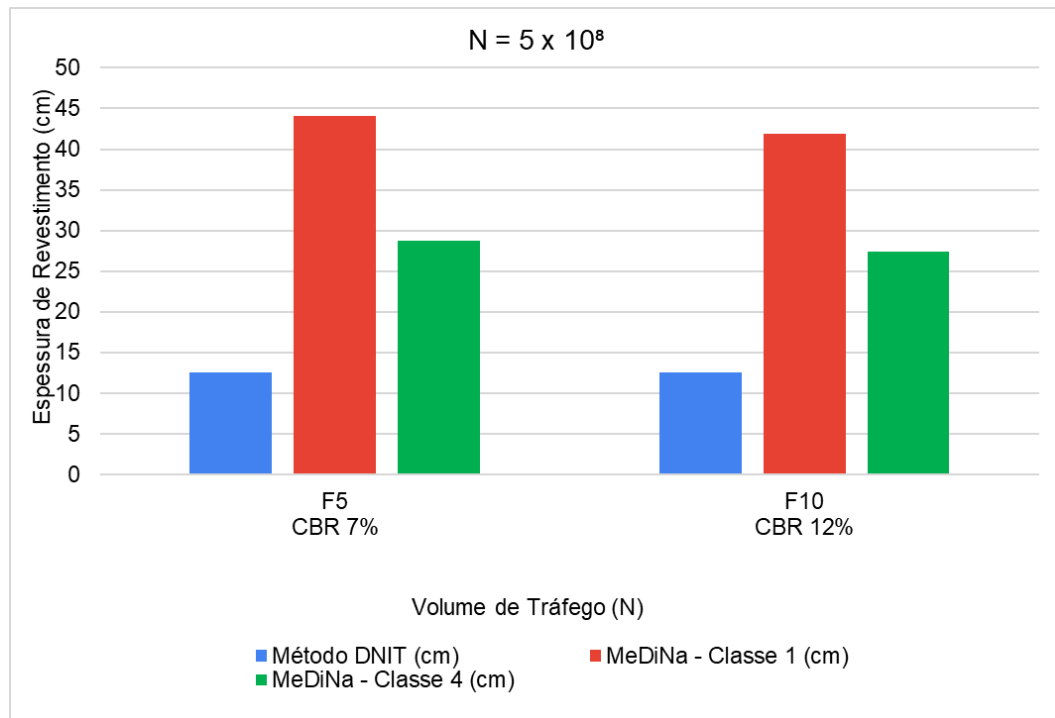


Fonte: Autores (2025).

Para $N = 5 \times 10^7$, o gráfico da figura 27 repete o que foi observado para a figura 26 no que se refere à diferença entre os métodos, no entanto a Classe 4 também requer maior espessura em todos os casos, novamente reforçando o subdimensionamento do método DNER/81 para alto volume de tráfego.

A variação do CBR do subleito não provocou diferenças significativas de espessura em nenhuma das classes de revestimento, no entanto o revestimento de Classe 4 apresentou espessura menor que a Classe 1, o que reforça o seu melhor desempenho .

Figura 28 - Gráfico do CBR do subleito por espessuras de Revestimento para o mesmo volume de tráfego (5×10^8)



Fonte: Autores (2025).

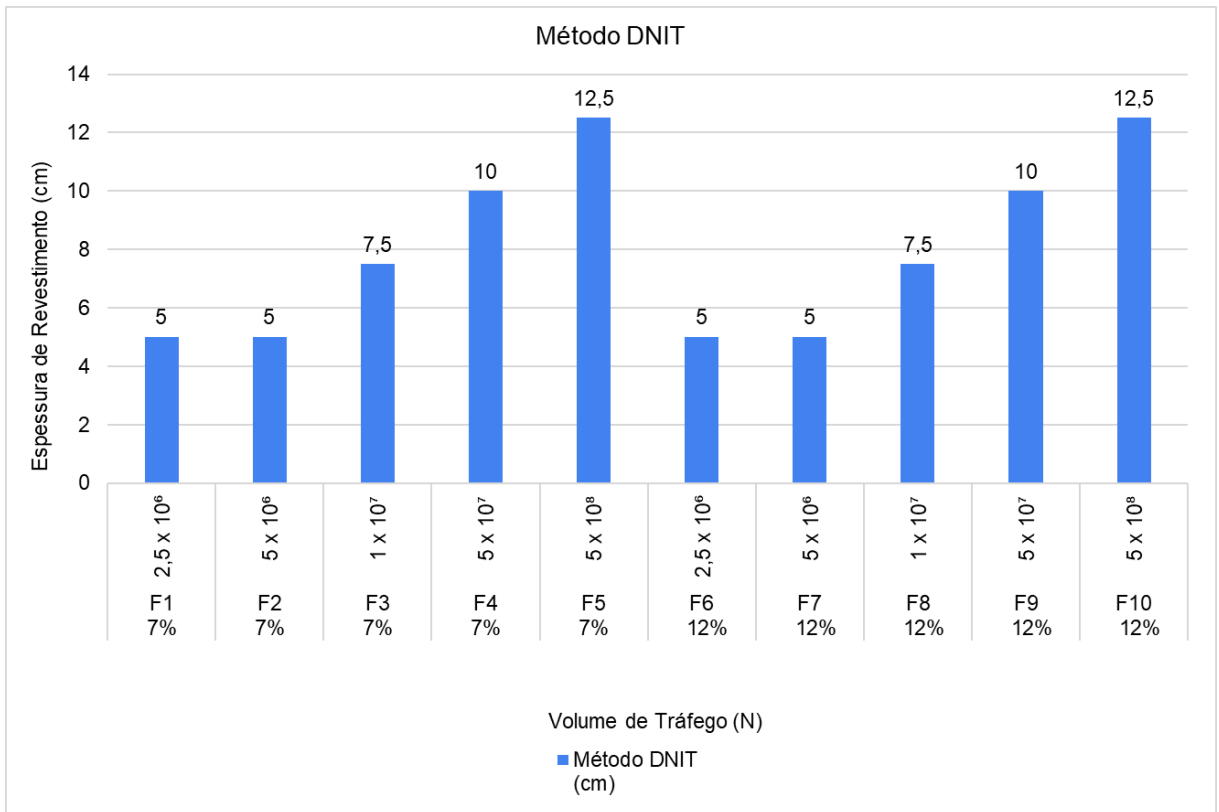
E por fim, para $N = 5 \times 10^8$, no gráfico da figura 28, observa-se que a espessura do revestimento diminui à medida que o CBR aumenta, mas novamente, são valores que não representam grande significância.

No mesmo gráfico, percebe-se que os resultados encontrados pelo método DNER/81 (colunas azuis) apresentam espessuras de revestimento muito menores do que as propostas pelo MeDiNa (tanto Classe 1 quanto Classe 4). Foi observado também, que a Classe 4 tende a apresentar menor espessura de revestimento quando comparado à Classe 1, o que pode ser explicado devido ao seu maior módulo de resiliência.

4.3.2 Comportamento dos Métodos de Dimensionamento

A seguir os mesmos resultados serão apresentados separadamente para cada método: DNIT, MeDiNa Classe 1 e MeDiNa Classe 4, com o objetivo de entender como cada método se comporta com as variações de tráfego e CBR do subleito. Inicialmente se observa o método DNER/81 (Fig 29):

Figura 29 - Gráfico do volume de tráfego por espessuras de revestimento pelo método DNIT

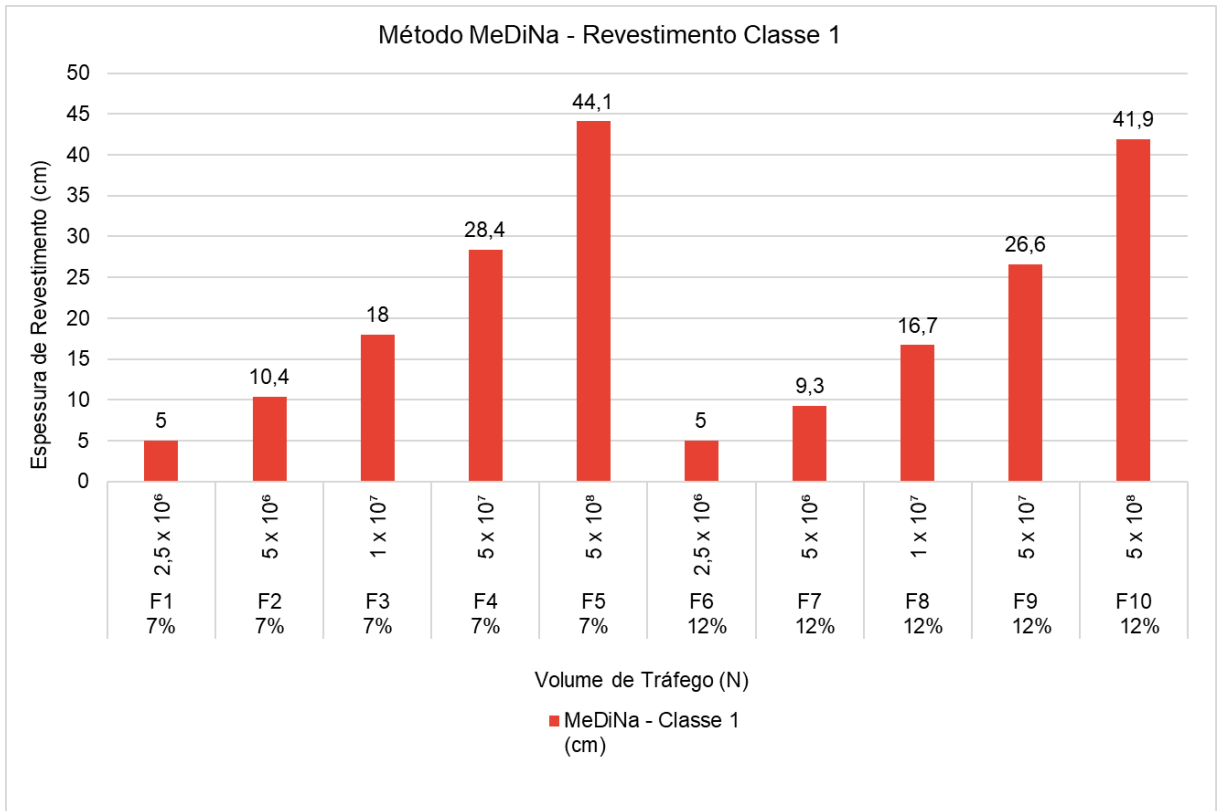


Fonte: Autores (2025).

O método DNER/81, segue a mesma evolução de espessura nos dois casos de CBR do subleito, isso é previsível, visto que o Método DNER/81 adota o tráfego como critério de dimensionamento do revestimento.

A seguir a mesma análise é feita para o método MeDiNa, com revestimento Classe 1 (Fig. 30):

Figura 30 - Gráfico do volume de tráfego por espessuras de revestimento pelo método MeDiNa, com revestimento Classe 1

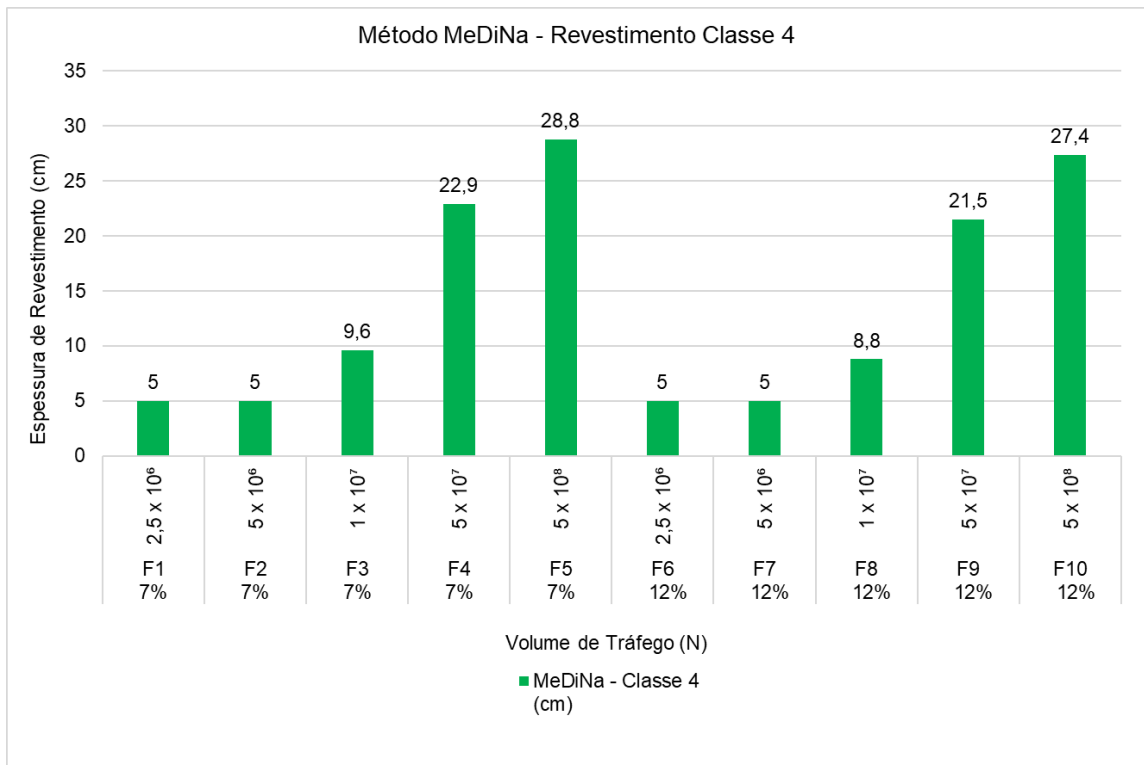


Fonte: Autores (2025).

O método MeDiNa com revestimento Classe 1, possui um padrão semelhante, mas a variação de espessura é muito mais acentuada, partindo de 5 cm e aumentando até o valor de 44,1 cm para um CBR de 7% e até 41,9 cm para um CBR de 12%.

Repete-se a análise para o método MeDiNa, com revestimento Classe 4 (Fig. 31):

Figura 31 - Gráfico do volume de tráfego por espessuras de revestimento pelo método MeDiNa, com revestimento Classe 4



Fonte: Autores (2025).

Ao repetir a análise para a Classe 4 de revestimento, se observa um crescimento exponencial menos acentuado de sua espessura, quando comparado à Classe 1. Além disso, a variação total foi menor partindo de 5 cm (F1) e alcançando 28,8 cm (F5).

4.3.3 Variação de Volumes de Tráfego

Em ambos os casos (CBR 7% e 12%), à medida que o volume de tráfego aumenta, a espessura do revestimento cresce significativamente. Por mais que a taxa de crescimento da espessura seja mais acentuada para CBR 7%, este não é o fator mais relevante para obtenção da espessura do revestimento, salvo exceções.

Para os maiores volumes de tráfego (5×10^8), a diferença entre os métodos torna-se mais evidente, com o MeDiNa – Classe 1 e MeDiNa - Classe 4 apresentando espessuras superiores a 40 cm e à 27 cm, respectivamente, enquanto o DNER/81 apresenta sempre o valor tabelado de 12,5 cm.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Influência da variação do CBR do Subleito

A variação da capacidade de suporte do subleito, representado pelo CBR e correlacionado com o Módulo de Resiliência do material não mostra relevância significativa na espessura do revestimento, para os valores utilizados nestas análises.

5.2 Influência do volume de tráfego

A variação do volume de tráfego comprovou ser o fator mais determinante na obtenção da espessura do revestimento, em todos os cenários o revestimento obedece a um padrão de crescimento à medida que N aumenta. Esse fator reforça a importância dos estudos preliminares ao dimensionamento, como a obtenção dos dados de tráfego e estimativa de crescimento ao longo da vida útil, bem como fiscalizações dos veículos que trafegam nas rodovias, garantindo que atendam às cargas máximas permitidas.

5.3 Influência da classe de revestimento

- a) A Classe 4 de revestimento demonstra ter maior impacto na redução da espessura para médio e alto volume de tráfego, $5 \times 10^6 \leq N \leq 5 \times 10^8$, para ambos os valores de CBR do subleito;
- b) A Classe 4 de revestimento impacta significativamente para uma redução da área trincada do revestimento no mesmo período, oferecendo maior conforto ao usuário no final da vida útil.

5.4 Influência do método de dimensionamento

O comportamento das espessuras de revestimento varia conforme o método de dimensionamento adotado. O Método DNER/81 mantém um padrão previsível,

com crescimento uniforme da camada em todos os casos analisados. Por outro lado, o método MeDiNa apresenta maior sensibilidade às condições do subleito.

Os dois métodos são baseados em diferentes características de resistência mecânica dos materiais, CBR e Módulo de Resiliência. Neste estudo, foi adotada uma correlação entre eles para obter resultados equiparáveis, no entanto, há outras correspondências entre estas propriedades disponíveis na bibliografia que podem obter resultados diferentes. O fato de não haver uma correlação universal entre estas propriedades, tornou a análise mais desafiadora, pois foi necessário buscar uma fórmula coerente com os materiais utilizados.

Os resultados demonstram que o método DNER/81 é insuficiente para o dimensionamento de pavimentos em volumes de tráfego superiores à $N = 5 \times 10^6$, comprometendo sua durabilidade. Se faz necessária, nestes casos, a avaliação por métodos mais atualizados, como o MeDiNa, que por sua vez requer um estudo mais aprofundado dos materiais constituintes do pavimento.

Isso reforça a importância de considerar a metodologia adequada para cada situação de tráfego e classe de revestimento.

5.5 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos, é possível sugerir trabalhos que explorem a combinação de diferentes classes de revestimento, utilizando a Classe 1 como camada de ligação (binder) e a Classe 4 como camada de rolamento, por exemplo. Essa configuração pode ser avaliada em diferentes cenários de volume de tráfego e tipos de pavimento, analisando a espessura total do revestimento.

Além disso, é interessante avaliar o impacto dessa combinação no afundamento de trilha de roda e na redução de áreas trincadas, especialmente em situações de médio e alto volume de tráfego. Estudos adicionais também poderiam incluir análises econômicas comparativas ao verificar custos de construção e manutenção, com a finalidade de se obter a viabilidade técnica e financeira dessa proposta em diferentes contextos de infraestrutura viária.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *AASHTO guide for design of pavement structures*. Washington, D.C.: AASHTO, 1993. Disponível em: <https://habib00ugm.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/05/aashto1993.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2025.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; ALVAREZ, C. E.; SOUZA, F. V. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). *Pesquisa de rodovias 2017: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?* Brasília: CNT, 2017. Disponível em: <http://www.cnt.org.br>. Acesso em: 19 mar. 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). *Pesquisa de rodovias 2024*: Brasília: CNT, 2024. Disponível em: <http://www.cnt.org.br>. Acesso em: 19 mar. 2024.

CNT Pesquisa de Rodovias 2018: Relatório Gerencial. Brasília: CNT, 2018. Disponível em: <http://www.cnte.org.br>. Acesso em: 30 mar. 2024.

COSTA, B. R. **Avaliação da implantação do dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo método MeDiNa no contexto brasileiro**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

COUTINHO, J. C. P. *Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicado a um trecho*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

CUSTÓDIO, Diego Agnelo da Silva. **Caracterização à fadiga de misturas asfálticas por compressão diametral e comparação com os resultados do ensaio de tração-compressão**. 2022. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT - Manual de pavimentação. 3o Edição. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). MeDiNa 1.1.4: manual de utilização. Brasília: DNIT, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT IPR 720. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. 1. ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Norma DNIT 142/2022 – Pavimentação: Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Brasília, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT Planejamento e Pesquisa. **MEDINA**. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/>> . Acesso em 06 abr. 2024.

FRANCO, A. C. P. **Análise elástica de múltiplas camadas** .Manual de Utilização. Versão 2.4. Rio de Janeiro, 2018

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento Mecanístico empírico de pavimentos asfálticos - SisPav**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GOUVEIA, D. F. **Comparação entre pavimentos dimensionados com os métodos do DNER (1981) e MeDiNa (2018): estudo de caso com solos de subleito da cidade de João Pessoa/PB**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia Consultiva) – Faculdade Ari de Sá, Fortaleza, 2022.

GRACIOLI, T.D. **Dimensionamento de diferentes estruturas de pavimentos submetidas a quatro solicitações de tráfego: análise pelos métodos do DNER e MeDiNa, considerando o desempenho e os custos por solicitação**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades e Estados: Brasil. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120?ano=2023&tipo=grafico>. Acesso em: 24 set. 2024.

KNABBEN, R. M.; CARPIO, J. A. V. **Como usar o software MeDiNa: o guia prático para a utilização do software MeDiNa de dimensionamento de pavimentos flexíveis**. Santa Catarina. E-book. Disponível em: <www.metodomedina.com.br>. Acesso em 08 abr. 2024.

LOPES, J. C. D. S. [et al]. **Revisão Bibliográfica sobre o Método Nacional De Dimensionamento do DNIT - MeDiNa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Civil) (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, MG, 2022. p. 66. Disponível em: https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ccivi/TCC-06_2022_1_Nayara%20e%20Jayne.pdf. Acesso em: 16 maio 2024.

MELO, Maria R. S. de. **Análise comparativa de dimensionamentos de pavimentos rodoviários - Método Medina e Murilo Lopes**. 35f. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Civil) - Núcleo de Tecnologia, UFPE, Caruaru, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/42552>. Acesso em: 05 abr. 2024.

MOTTA, L.M.G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critérios de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil). COPPE. UFRJ. Rio de Janeiro, 1991.

PEIXOTO, L. A. D. A. **Análise Comparativa Entre O Método Medina E O Método Cbr Para Dimensionamento De Pavimentos Flexíveis.** 51 p. Trabalho De Conclusão De Curso (Curso Superior De Engenharia De Transportes) - Universidade Federal De Goiás Faculdade De Ciências E Tecnologia, Aparecida De Goiânia, 2023.

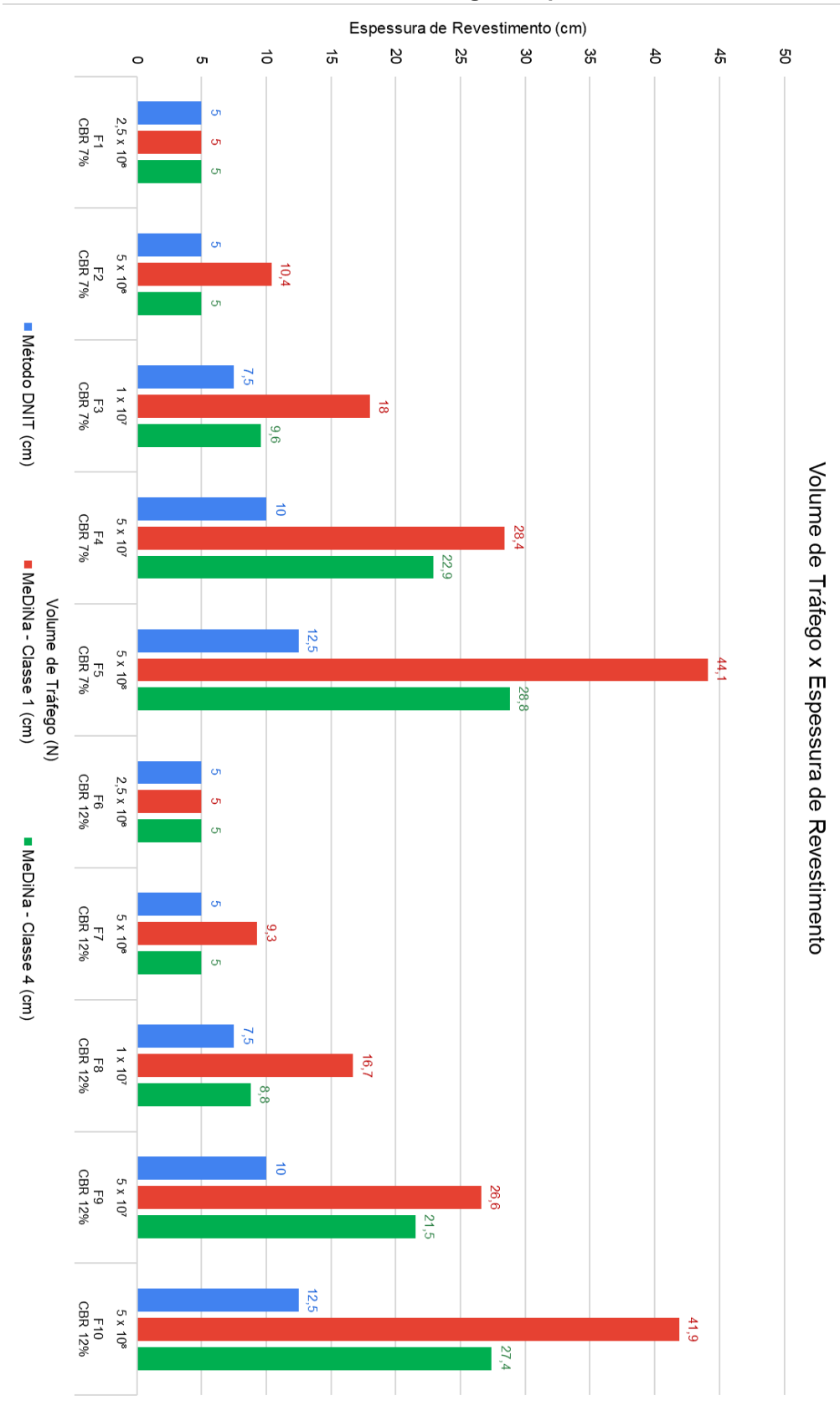
PIZUTTI, Priscila Rosa. **Análise comparativa da vida útil de projeto entre metodologias empírica, semi-empírica e empírico-mecanicista de dimensionamento de pavimentos.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 25.; REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 48., 2023.

SOUZA JUNIOR, José Geraldo de. Controle da posição das plataformas de petróleo em operações de perfuração. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SOUSA, Matheus N. **Dimensionamento de estruturas de pavimento: Aplicação do Método DNER (1981) e do Método Medina.** 99f.2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, IFSC, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/1524/TCC%20-%20Matheus%20Nilton%20de%20Sousa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 31 mar. 2024.

ANEXOS

ANEXO A - Gráfico do Volume de Tráfego x Espessuras de Revestimento



Fonte: Autores (2025).