

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

EMERSON HENRIQUE REDEDE MENDES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO EMPÍRICO E O MECANÍSTICO
(MEDINA)**

**GUARAPUAVA
2023**

EMERSON HENRIQUE REDEDE MENDES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO EMPÍRICO E O MECANÍSTICO
(MEDINA)**

Comparative analyses of the empirical and the mechanistic method (Medina)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Coordenação de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Prof. Dr. Petrônio Rodrigo Mello Montezuma

GUARAPUAVA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

EMERSON HENRIQUE REDEDE MENDES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO EMPÍRICO E O MECANÍSTICO
(MEDINA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Coordenação de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15 de dezembro/ 2023

Prof. Dr. Petrônio Rodrigo Mello Montezuma
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Henrique de Freitas
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Géssica Katalyne Bilcati
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**GUARAPUAVA
2023**

Dedico esse trabalho à minha mãe Gilza Maria Redede Mendes de Oliveira, por todo o suporte ao longo da minha jornada acadêmica, e a minha namorada Livia Santos Araujo Rocha, que tem me apoiado e logo trará ao mundo nosso ser mais precioso, nossa filha Angelina Rocha Mendes.

AGRADECIMENTOS

Através da graduação pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná pude transformar-me como pessoa e principalmente como profissional. Mais do que conteúdos e ensinamentos que nela tivemos acesso, pude desenvolver as características de um verdadeiro engenheiro, passando a me tornar apto a resolução dos mais diversos problemas. Um dos principais ensinamentos foi sobre a constante evolução que devemos nos manter sempre para honrar o título e entregar a melhor solução à demanda que nos é entregue na área que estivermos atuando.

Agradeço a oportunidade de desenvolvimento que os projetos que participei ao longo da graduação e a Universidade por proporcionar isso. Sou grato pelos colegas que se tornaram amigos que a graduação me trouxe e levarei para a vida. Agradeço ao meu orientador Prof. Petrônio Rodrigo Mello Montezuma, por toda a acessória durante a elaboração deste trabalho.

De nada valem as ideias sem homens que
possam pô-las em prática.

(KARL MARX)

RESUMO

Tratando de dimensionamento de pavimentos no Brasil costuma-se utilizar o método empírico de dimensionamento de pavimentos adotado pelo DNER em 1981, que se baseia nos resultados do ensaio de CBR (California Bearing Ratio). Desde então, foi desenvolvido o Método de Dimensionamento Nacional (Medina). O Medina é um método que combina abordagens mecânicas e empíricas, utilizando valores de módulo de resiliência e deformação permanente para estabelecer um processo de dimensionamento que leva em consideração o cálculo do estado de tensões e deformações na estrutura do pavimento.

Para avaliar a eficácia desses métodos, foram comparados através do estudo de caso dois processos de dimensionamento com base na duplicação da rodovia BR -277/ PR, subtrecho: km 344 ao Km 350+200m no município de Guarapuava, com extensão de 6,2 km de forma a verificar qual o melhor método para ser utilizado na via de estudo. A comparação entre as estruturas de pavimento propostas revelou que o método mecanístico-empírico resultou em uma estrutura mais espessa e resistente. Isso se traduziu em menores índices de trincamento por fadiga no revestimento asfáltico e afundamento na trilha de roda.

Palavras-chave: Pavimentação; Método Medina; Método empírico.

ABSTRACT

When it comes to pavement design in Brazil, it is common to use the empirical pavement design method adopted by DNER in 1981, which is based on the results of the California Bearing Ratio (CBR) test. Since then, the National Design Method (Medina) has been developed. Medina is a method that combines mechanical and empirical approaches, using values of resilience modulus and permanent deformation to establish a design process that takes into consideration the calculation of stresses and deformations in the pavement structure.

To assess the effectiveness of these methods, a comparative study was conducted through a case study involving two design processes for the duplication of the BR-277 highway in the state of Paraná, Brazil, in the subsection from km 344 to km 350+200m in the municipality of Guarapuava, covering a distance of 6.2 km. To compare and determine which method is best suited for use on this specific road. The comparison between the proposed pavement structures revealed that the mechanistic-empirical method resulted in a thicker and more robust structure. This translated into lower levels of fatigue cracking in the asphalt pavement and rutting.

Keywords: Pavement; Medina Method; Empirical Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação das camadas de espessuras finitas.....	17
Figura 2 – Estrutura correspondente ao Pavimento Rígido	19
Figura 3 – Estrutura correspondente ao Pavimento Flexível	20
Figura 4 - Determinação de espessuras do pavimento	30
Figura 5 - Curva Sigmoidal	33
Figura 6 – Mapa de localização da obra	35
Figura 7 – Geometria da trincheira	37
Figura 8 - Duplicação da BR-277 - Guarapuava	37
Figura 9 – Tela inicial do MeDiNa	39
Figura 10 - Esquema da seção modelada	41
Figura 11 – Simulação MeDiNa BR-277 - KM 344+100 A 346+000	45
Figura 12 – Simulação MeDiNa BR-277 - KM 344+100 A 346+000 considerando sistema arterial secundário	46
Figura 13 - Simulação MeDiNa BR-277 - KM 346+000 A 350+100	47
Figura 14 - Simulação MeDiNa BR-277 - VIA MARGINAL KM 344+100 A 350+000	48
Figura 15 – Gráfico dos resultados das simulações dos trechos estudados	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo de Patologias dos Pavimentos Flexíveis segundo o DNIT 005.22	
Tabela 2 – Condições e restrições gerais para o dimensionamento do pavimento ..	24
Tabela 3 – Roteiro da metodologia aplicada no método empírico	28
Tabela 4 – Dados Gerais da Pavimentação Analisada	36
Tabela 5 - Resumo de informações da BR-277 - KM 344+100 A 346+000	41
Tabela 6 – Resumo de informações da BR-277 - KM 346+000 A 350+100	42
Tabela 7 – Resumo de informações da BR-277 - VIA MARGINAL KM 344+100 A 350+000	42
Tabela 8 – Roteiro de Metodologia de dimensionamento de pavimentos pelo método Medina	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Pavimento	16
2.1.1 Composição de Pavimentos	17
2.1.2 Tipos de Pavimento	18
2.1.2.1 Pavimento Rígido	18
2.1.2.2 Pavimento Flexível	19
2.1.3 Comportamento estrutural dos pavimentos	20
2.1.4 Principais patologias dos pavimentos	21
2.2.1 Método Empírico	24
2.2.1.1 Análise de Tráfego e cálculo do número N	25
2.2.1.2 Cronologia e roteiro da Metodologia DNER	28
2.2.2 Método Mecanístico (Medina)	31
2.3 Critérios de Fadiga de Pavimentos	33
3 METODOLOGIA	35
3.1. Método Empírico utilizado na pavimentação	35
3.2. Método Medina simulado na pavimentação estudada	38
3.2.1. Análise e Dimensionamento	40
3.2.2 Roteiro da Metodologia Medina	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1. Análise segundo os métodos do DNER e Medina	45
4.1.1. Aplicando o Método MeDiNa	45
4.1.2. Análise segundo o Método DNER	49
4.1.3. Comparação entre os métodos	51

1 INTRODUÇÃO

Na década de 1960, foi introduzido no Brasil um método empírico de dimensionamento de pavimento flexível, o qual era utilizado para dimensionar a maioria das rodovias pavimentadas brasileiras (PITANGUI, 2019), esta estrutura ainda é a mais comum e utilizada e diariamente observa-se os grandes problemas que esses pavimentos flexíveis apresentam e o grande investimento por parte do governo para manter as estradas conservadas (LAUBE; BATISTA; LEITE, 2021).

O aumento da frota de veículos combinado com cargas excessivas em rodovias e fretamentos operados por longas distâncias, acarretou em uma redução na vida útil dos pavimentos asfálticos (SILVA; GODOI; HOLZ, 2019). Desta forma, surge a ineficiência do pavimento em cumprir com seu principal objetivo o qual consiste em proporcionar ao usuário condições de trafegar por estas vias de forma confortável e segura (VENDRUSCULO *et al.*, 2018).

Atualmente no Brasil, o transporte rodoviário é o principal sistema logístico do país. No entanto, de acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT) apenas 12,4% da extensão total das rodovias brasileiras são pavimentadas, o que corresponde a 213,5 mil quilômetros (CNT, 2021).

Diante deste cenário, o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) busca atualizar seu método de dimensionamento para melhor atender a malha rodoviária terrestre e buscar maior durabilidade e maior resistência ao tráfego de veículos pesados (LAUBE; BATISTA; LEITE, 2021).

Conforme enfatizado por Vendrusculo *et al.* (2018) há uma necessidade óbvia, conforme apontado por Laube (2021) de atualizar o método empírico de dimensionamento atual, substituindo-o por um novo método nacional para projetar pavimentos flexíveis levando em conta uma abordagem mecanicista, e este método é conhecido como método mecanístico do software Medina. Sendo esta modernização do método necessária devido ao cenário de maior exigência de qualidade e durabilidade dos pavimentos brasileiros.

Baseado neste contexto, usar-se-á como base para esse trabalho um estudo comparativo entre o método atual do DNIT e o Medina para pavimento flexível, tendo como objetivo diferenciar os dois processos de dimensionamento com base na duplicação da rodovia BR -277/ PR, subtrecho: km 344 ao Km 350+200m no

município de Guarapuava, com extensão de 6,2 km e com isso observar qual será o melhor método para ser utilizado na via de estudo.

1.1 Justificativa

De forma geral, este trabalho aborda as diferentes possibilidades que se tem com de dimensionamento para pavimentos flexíveis. Pavimentos estes, que são intensamente utilizados no Brasil como principal meio de transporte, trazendo assim a necessidade de pesquisa e otimizações na área.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O intuito deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre os métodos normatizados de dimensionamento de estruturas de pavimentos flexíveis, sendo estes: o método empírico e o método mecanístico Medina, analisando o projeto da duplicação da rodovia BR -277/ PR, subtrecho: km 344 ao Km 350+200m no município de Guarapuava.

1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos estão:

- Demonstrar as características, vantagens e desvantagens de cada método;
- Avaliar as estruturas obtidas por meio da implementação dos dois métodos;
- Comparar resultados obtidos de ambos os métodos;
- Verificar a viabilidade da adoção dos métodos para dimensionamento de pavimentos flexíveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pavimentação no Brasil possui raízes que remontam ao período colonial, quando as primeiras vias foram concebidas primordialmente para a facilitação do transporte de mercadorias e o deslocamento das tropas coloniais. Todavia, a pavimentação propriamente dita, com o emprego de técnicas modernas, teve seu ponto de partida no século XIX.

A pavimentação asfáltica, tal como a conhecemos nos dias atuais, começou a ganhar notoriedade no Brasil no início do século XX. Nesse contexto, o engenheiro norte-americano John Casement introduziu o asfalto como uma solução viável para aprimorar a qualidade das vias brasileiras. Casement foi o responsável pela pavimentação da Avenida Central, no Rio de Janeiro, atualmente denominada Avenida Rio Branco, inaugurada em 1904, representando um dos primeiros exemplos de aplicação do asfalto em pavimentação no país (SMITH, 2005).

A disseminação do uso do asfalto no Brasil seguiu gradativa desde então. A partir disso o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) surgiu em 1937. Tendo como objetivo direcionar e normatizar o plano geral de estradas de rodagem nacionais, além de execução, fiscalização de obras e policiamento das estradas e pontes nacionais. De acordo com a lei n. 467, de 31 de julho de 1937, e decreto n. 3082, de 17 de setembro de 1938, que direciona o DNER para a normatização das estradas no Brasil (SILVA, 2010).

O DNER desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento da engenharia rodoviária no país, promovendo pesquisas e estudos que culminaram na otimização das técnicas de pavimentação (LUVIZOTTO JUNIOR, 2008).

Nas décadas subsequentes, o Brasil manteve seus esforços na pavimentação de estradas e rodovias, merecendo destaque a construção da Rodovia Presidente Dutra, que conecta São Paulo ao Rio de Janeiro que foi inaugurada em 1951. Esta rodovia se erigiu como um paradigma na infraestrutura viária nacional e serviu como referência para empreendimentos futuros na área de pavimentação (CCR NOVADUTRA, 2011).

A pavimentação no Brasil, atualmente, configura-se como um setor em constante desenvolvimento, adotando técnicas de construção e manutenção sofisticadas em prol da garantia da segurança e eficiência do transporte rodoviário

em todo o território nacional (SILVA, 2020). A evolução desse campo transcende meramente a progressão técnica, transformando-se em uma narrativa que reflete não apenas os avanços tecnológicos, mas também as significativas mudanças sociais e econômicas que permearam a história do país (CARVALHO, 2018).

2.1 Pavimento

Pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem, destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos do tráfego (SENÇO, 2008), esta estrutura construída em uma superfície de estrada ou caminho permite o tráfego de veículos e pedestres, é uma parte importante da infraestrutura urbana e rodoviária, e é essencial para garantir a segurança e a eficiência do transporte (SANTANA, 1993).

Pitangui (2019) caracteriza pavimentos como um sistema estrutural de camadas finitas sobre a superfície da terraplenagem, com o propósito técnico e econômico de suportar as tensões causadas pelo tráfego e condições climáticas, promovendo melhores condições de circulação para os usuários em termos de conforto, segurança e eficiência.

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2021), o pavimento tem a função de:

- i. Proporcionar segurança ao tráfego nas rodovias;
- ii. Suportar os efeitos das mudanças de clima;
- iii. Permitir deslocamentos suaves na sua superfície;
- iv. Não gerar desgaste excessivos dos pneus e nível alto de ruídos;
- v. Possuir uma estrutura durável e resistente ao fluxo de veículos;
- vi. Permitir o escoamento da água na sua superfície, direcionando-a para um sistema de drenagem eficiente e ter boa resistência a derrapagens.

Em sua constituição, o pavimento deve possuir camadas que distribuem solicitações para limitação de carga, estresse e tensão para garantir um desempenho adequado da via por um longo período de tempo (CNT, 2021).

O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Alguns autores têm empregado ainda mais uma subdivisão, representada pelos pavimentos semirrígidos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

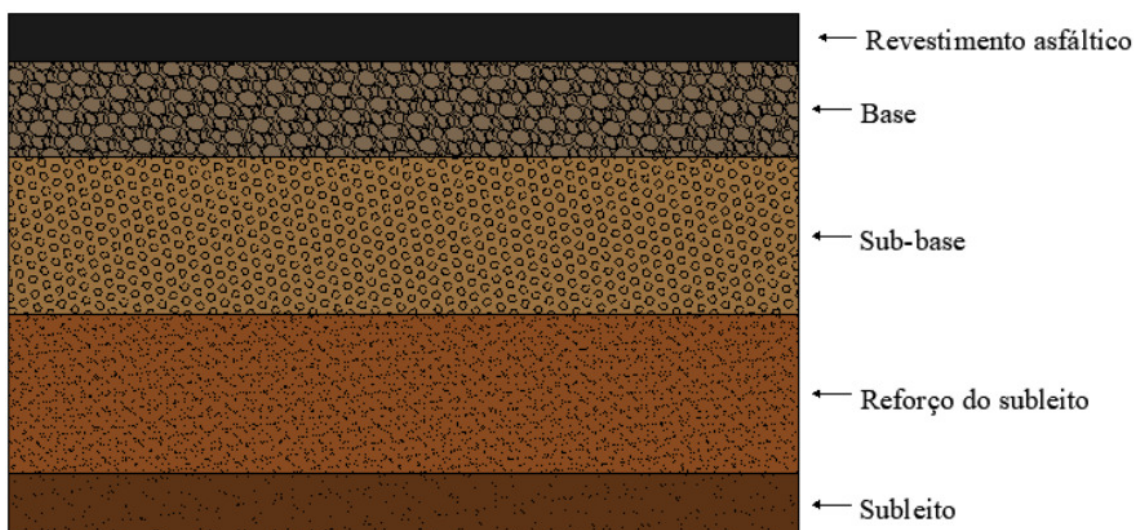
Os pavimentos rígidos são compostos por uma camada de concreto de cimento Portland, oferecendo alta capacidade de carga e resistência a deformações permanentes, sendo ideais para áreas com tráfego intenso como estradas principais e aeroportos, demandando menos manutenção. Já os pavimentos flexíveis, construídos com múltiplas camadas incluindo asfalto, são mais flexíveis e distribuem melhor as cargas, sendo adequados para estradas com menor tráfego e terrenos propensos a movimentos, porém requerem manutenção regular devido à sua maior suscetibilidade a deformações (SILVA, 2021).

Atualmente, usa-se a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) para designar o pavimento rígido e pavimentos asfálticos, para o pavimento flexível (BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.1.1 Composição de Pavimentos

Abordando a estrutura das rodovias o pavimento, EIRAS, et.al. (2018) demonstra sua composição de acordo com as camadas representadas na figura 01, onde o subleito, um espaço teoricamente infinito, consiste em material natural compactado.

Figura 1 - Representação das camadas de espessuras finitas.



Fonte: ALMEIDA (2019).

- Na composição de estruturas após uma camada de regularização, o subleito é formado por material de qualidade superior à regularização, mas inferior às camadas superiores, compreendendo a sub-base.
- A base é projetada para suportar os impactos do tráfego e distribuí-los às várias camadas. O pavimento, em sua estrutura, consiste em base e revestimento, podendo a base ser complementada pela sub-base e/ou reforçada pelo subleito.
- A sub-base atua como camada adicional à base, não sendo viável ou necessário construir diretamente sobre a regularização ou o reforço do subleito.
- No que diz respeito ao revestimento asfáltico, as opções incluem asfalto usinado a quente, sendo o concreto asfáltico (CA ou CBUQ) o mais comum no país. O CBUQ é composto por uma mistura de agregados variados e compostos betuminosos, aquecidos a temperaturas determinadas conforme o traço prescrito por profissionais qualificados, adaptando-se às especificidades de cada faixa no pavimento (EIRAS, et.al., 2018).

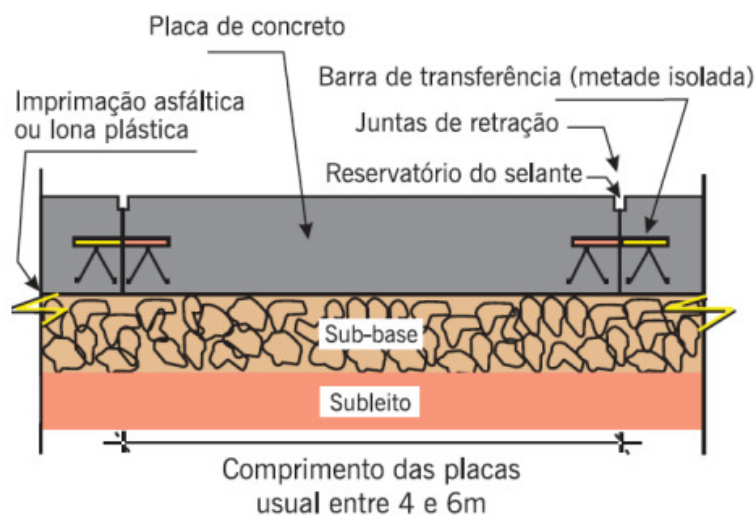
Vitorazzi e Pachecco (2023) abordam que pavimentos podem ser classificados em função do tipo de bases e subbase, divididas em granulares e estabilizada. Sendo as granulares as que utilizam pedras britadas, enquanto as estabilizadas compostas por aditivos. A base é uma camada do pavimento projetada para suportar as cargas verticais dos veículos, distribuindo-as adequadamente para a camada subjacente. Ela é construída sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito, devidamente regularizados e compactados, conforme a Norma DNIT 141/2010-ES.

2.1.2 Tipos de Pavimento

2.1.2.1 Pavimento Rígido

Também conhecidos como concreto-cimento possuem uma placa de concreto de cimento Portland que podem ser armadas com ou não com barras de aço (PITANGUI, 2019). A espessura nesse tipo de pavimento é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes (BERNUCCI *et al.*, 2010; SANTOS, 2022).

Figura 2 – Estrutura correspondente ao Pavimento Rígido



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

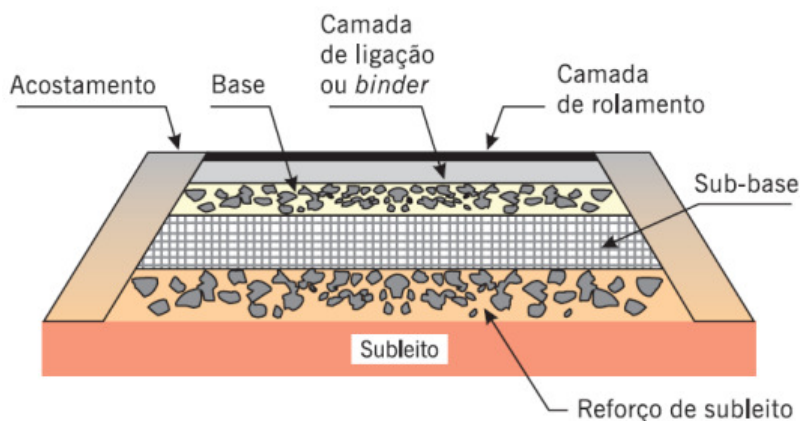
2.1.2.2 Pavimento Flexível

O pavimento flexível (Figura 3) é um tipo de estrutura de pavimento mais presente nas rodovias do país, sendo que o pavimento asfáltico é o tipo mais comum dentro dessa classificação (SILVA, 2021).

São aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (CIPRIANO; LIMA; SILVESTRE, 2021).

O pavimento flexível é composto de camadas de materiais de construção como base, sub-base, binder e camada de rolamento. A base é composta de materiais granulares, como pedra britada, e é projetada para suportar a carga de tráfego. A sub-base é composta de materiais mais finos, como areia, e ajuda a nivelar a superfície da base (PIRES, *et al.*, 2019).

Figura 3 – Estrutura correspondente ao Pavimento Flexível



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

O binder é uma camada intermediária composta de materiais betuminosos, como o asfalto, que é responsável por ligar as camadas inferiores do pavimento. A camada de rolamento é a camada superior do pavimento, que é projetada para suportar a carga dos pneus dos veículos e proporcionar uma superfície de tráfego suave e segura (SANTOS, 2022).

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), o seu dimensionamento é por tração e flexão, por causa dos esforços que os veículos provocam, levando a deformações permanentes. O material usado neste tipo de pavimento é basicamente composto por concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) (SILVA, 2021).

O CAUQ representa a mistura asfáltica de maior aplicação no Brasil, sendo essencial a sua correta especificação no projeto para atender aos requisitos técnicos e econômicos estipulados. Esta camada, constituída pelo CAUQ, é a superfície primária das vias, em contato direto com o tráfego, devendo garantir não só conforto, conveniência e segurança aos usuários, mas também apresentar propriedades de impermeabilidade e proteção para o restante da estrutura de suporte da via (SEVILHA, 2019).

2.1.3 Comportamento estrutural dos pavimentos

As condições climáticas e o tráfego geram solicitações que degradam as propriedades mecânicas e funcionais dos materiais do pavimento, ocasionando patologias que afetam a segurança e a comodidade na circulação rodoviária.

Visando controlar essas degradações e avaliar ao longo do tempo a capacidade estrutural dos pavimentos, de forma a garantir seu comportamento adequado através de avaliação estrutural e posterior reabilitação, quando necessário (FRANCISCO, 2012).

Nos estudos de Lima (2017) sobre o excesso de peso nas rodovias federais brasileiras, foi realizado um levantamento dos dados de pesagem, revelando que o sobrepeso dos veículos pode significativamente diminuir a vida útil do pavimento. O autor apontou que investir em fiscalização, usando equipamentos de pesagem dinâmica, poderia efetivamente reduzir os custos elevados associados à reparação do pavimento flexível em estradas federais gerenciadas pelo DNIT.

Santos (2018) analisou como diferentes níveis de rigidez dos materiais afetam o comportamento estrutural de pavimentos asfálticos. O estudo considerou fatores como fadiga das camadas asfálticas, deformação permanente e a interação entre elas. Utilizando equações específicas, examinou a deformação horizontal na parte inferior das camadas asfálticas e a deformação vertical no topo do subleito.

Os resultados destacaram que a aderência completa entre as camadas reduz as deformações, com a influência da interface foi mais significativa em camadas asfálticas mais rígidas, afetando não apenas o revestimento, mas também as camadas inferiores do pavimento. Mostrou-se também que a aderência perfeita entre as camadas resultou em uma vida útil do pavimento significativamente maior. Mostrando a necessidade da aderência entre as camadas durante todo o processo, desde o projeto até as fases de construção, pois essa aderência direta influencia diretamente na durabilidade do pavimento em serviço (SANTOS, 2018).

2.1.4 Principais patologias dos pavimentos

Abordando as patologias presentes nos pavimentos flexíveis Amaral, *et.al.* (2021) apontam que boa parte dos pavimentos no Brasil exigem reparos em menos de 12 anos, condição agradava devido ao alto fluxo do transporte terrestre as estradas. Tratando da origem dessas patologias apontou-se como principais causas: a má execução do projeto desse pavimento flexível e da execução do mesmo, a sobrecarga de veículos de carga e condições climáticas agravantes.

As falhas em pavimentos flexíveis são variadas e incluem defeitos superficiais, degradações e deformações. Esses problemas podem ser funcionais, afetando a utilidade para os usuários, ou estruturais, resultantes de danos sob cargas específicas (AMARAL, *et.al.*, 2021). A norma brasileira DNIT 005 identifica defeitos como exsudação de asfalto, subida de finos, escorregamento do revestimento, fendas, afundamentos, corrugações e rodeiras, conforme descritos na tabela 01. Estes problemas estão ligados à estrutura e à superfície do pavimento, conforme definido pela norma.

Tabela 1 – Resumo de Patologias dos Pavimentos Flexíveis segundo o DNIT 005

Patologia	Causa da Patologia
Exsudação de asfalto	Ocorre devido à expansão do asfalto pelo calor, sem espaço suficiente, devido a baixo volume de vazios ou maior quantidade de ligantes. Manifesta-se como brilho na superfície devido ao excesso de ligantes betuminosos.
Desgaste	Resulta de diversas questões, incluindo ação do tráfego, condições climáticas, falta de ligantes, uso inadequado de materiais ou erros na construção.
Escorregamento do revestimento	Geralmente formado por veículos durante a frenagem devido à baixa resistência do pavimento ou má estrutura.
Subida de finos	Ocorre quando a água do subsolo é expulsa através das fendas pelo tráfego
Fendas ou fendilhamento	Principalmente causado pela exaustão dos materiais nas camadas betuminosas devido à tração causada pelos veículos. Classificação por tipos, tamanhos e severidade.
Afundamentos	Alterações verticais causadas pela passagem repetida de veículos, sendo plásticos ou de consolidação.
Peladas	Resultam da redução da camada de desgaste, fraca ligação entre camadas ou instabilidade da camada de desgaste.
Corrugações ou ondulações	Tensões cisalhantes latitudinais causadas pela aceleração dos veículos. Associadas a base instável ou baixa quantidade de ligantes.
Rodeiras ou trilhas de rodas	Depressões longitudinais devido à consolidação ou degradação dos materiais submetidos ao tráfego.

Fonte: Adaptado de AMARAL *et.al.*, (2021).

Braga (2021), ao estudar as patologias em vias flexíveis, corroborou as conclusões de Amaral ao apontar que o intenso tráfego, especialmente em altas velocidades, é a principal causa dessas condições adversas. O peso excessivo dos veículos gera pressão no revestimento, desencadeando variadas patologias. Essa sobrecarga é, em grande parte, fruto da falta de fiscalização nas rodovias, permitindo o transporte de cargas que excedem os limites estabelecidos e contribuem para o surgimento desses problemas.

Para prevenir tais patologias, Braga ressalta a necessidade de fiscalizações mais rigorosas, identificação precoce de irregularidades nas estradas e a subsequente execução de manutenções e reparos. Essas ações são fundamentais para evitar a formação de novas patologias e minimizar gastos desnecessários em obras de restauração. Deficiências na pesquisa de sistemas de drenagem, manutenção inadequada, falhas na construção das vias, sobrecarga excessiva, tráfego intenso e uso de materiais de baixa qualidade são identificadas como principais fatores desencadeadores desses problemas.

2.2 Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

Segundo Marques (2014) e Silva (2021), o dimensionamento do pavimento flexível consiste em determinar as espessuras de cada camada para suportar e transmitir cargas de tráfego ao subleito, sem deformação e fissuração da estrutura.

A maioria dos métodos de dimensionamento são adaptações de métodos básicos adicionadas a características dos locais de estudo, diferenciando apenas a falta de definição de um critério único de ruptura da estrutura (BALBO, 2007).

Balbo (2007) ressalta ainda que existem três critérios que são utilizados como base dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, sendo eles: i) Método Empírico, ii) Método Semiempírico e iii) Método Mecanístico-Empírico.

Quanto à observação do estado de condição dos pavimentos de acordo com parâmetros medido, em campo, alguns dos pontos a serem observados são o da extrapolação e expansão de resultados empíricos com base em uma teoria analítica consistente, a calibração entre modelos teóricos com dados experimentais obtidos em campo e em laboratório (BALBO, 2007).

2.2.1 Método Empírico

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado no Brasil é essencialmente empírico, e teve sua primeira publicação em 1960 (FERREIRA, 2021). O método adotado pelo DNIT foi proposto pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza. Com base no critério do CBR, o eixo-padrão de 80 KN é considerado o coeficiente de equivalência obtido na pista experimental da AASHTO (MOTTA, 1991; MEDINA *et al.*, 2015; BALBO, 2007).

Conforme Pitangui (2019), o método de dimensionamento com base no ensaio CBR foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE). A partir da Segunda Guerra, em 1939, emergiu a necessidade do uso de aviões bombardeiros mais pesados do que os pavimentos da época suportavam e assim a consequente necessidade de adequação de dimensionamento de pavimentos aeroviários mais eficientes do que os utilizados comumente, vindos da área rodoviária. A partir disto, o método mostrou-se de fácil assimilação, rápido e eficiente.

Silva (2018) descreve que no método DNER tratando-se resistência dos materiais a avaliação da capacidade de resistência do subleito e dos materiais do pavimento é determinada pelo CBR. Esse teste utiliza corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório, considerando condições específicas de massa aparente e umidade para as necessidades de serviço do pavimento. A partir do CBR são determinadas algumas condições e restrições gerais para o dimensionamento do pavimento de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 – Condições e restrições gerais para o dimensionamento do pavimento

Camada	Condições e restrições
Materiais do subleito	Condicionado à uma expansão máxima de acordo com o CBR de 2%, e CBR \geq 2%
Materiais para reforço do subleito	Condicionado ao CBR maior que o subleito e expansão \leq
Materiais para sub-base	Condicionado ao CBR \geq 20%, índice de grupo (IG) = 0 e expansão \leq 1%
Materiais	Condicionado ao CBR \geq 80%, expansão \leq 0,5%, Limite de Liquidez (LL) \leq 25% e Índice de Plasticidade (IP) \leq 6%

Fonte: DNIT (2006).

2.2.1.1 Análise de Tráfego e cálculo do número N

Para prosseguir no dimensionamento do pavimento é necessário realizar a avaliação do tráfego rodoviário, que envolve uma variedade de veículos com diferentes configurações de pneus e cargas distintas. A fim de modelar essa dinâmica, é necessário considerar a contagem de veículos, distribuição do peso nos eixos, velocidade, desvio lateral em relação à estrada, geometria dos eixos e pressão dos pneus. Além deste ponto é necessário se atentar a prever o crescimento do tráfego e suas variações sazonais é crucial, já que o horizonte de projeto do pavimento é, no mínimo, de 10 anos (FRANCO, 2007).

O Método Empírico do DNIT é utilizado para estimar as solicitações de tráfego esperadas ao longo desse período, expressando-as como um Número equivalente (N) em relação ao horizonte de projeto (P). Esse método converte as diversas operações de diferentes tipos de eixos de veículos em operações equivalentes a um eixo padrão com carga de 8,2 toneladas. Isso padroniza matematicamente os veículos, mantendo o mesmo impacto destrutivo das solicitações do tráfego (FRANCO, 2007).

O dimensionamento do pavimento consiste basicamente na determinação das espessuras das camadas estruturais, de forma a atender o número N , Silva (2018) aborda o número N com a definição do número de operações de um eixo-padrão (equivalente a 8,2 toneladas), através da determinação das características do tráfego. A partir número N obtém-se a espessura mínima do revestimento e pode ser calculado através da equação 1.

$$N = Vt \cdot Fv \cdot Fr \tag{01}$$

Onde:

Vt = volume total de veículos em todo período de projeto.

Fv = fator de veículos.

Fr = fator climático regional.

Prosseguindo para a quantificação de N é necessário calcular o volume total de veículos (Vt), que é obtido através das equações 02 e 03.

$$Vt = 365 \cdot P \cdot Vm \quad (02)$$

$$Vm = \frac{V1(2 + \frac{(P-1) \cdot t}{100})}{2} \quad (03)$$

Onde:

Vt = Volume total de veículos.

P = Período de projeto.

T = Taxa de crescimentos anual da frota.

Vm = Volume diário médio de tráfego do ano médio de análise.

$V1$ = Volume médio diário de tráfego no ano de abertura.

Para avaliar o crescimento da frota através de padrão geométrico é utilizada a equação 04.

$$Vt = \frac{361 * V1 * \left[\left(1 + \frac{t}{100} \right)^p - 1 \right]}{t/100} \quad (04)$$

Soares e Motta (2001) em seu estudo a respeito das considerações sobre a determinação do fator de veículo no cálculo do número N , abordam fator de equivalência de carga, fator de carga fator de eixo e fator de veículo de forma como quesitos diretamente ligado ao cálculo do número N .

Iniciando pelo Fator de Equivalência de Carga (FEC) que converte diferentes tipos de eixos e suas cargas em um valor equivalente que representa o impacto estrutural no pavimento. Esse fator permite expressar o efeito combinado das cargas de diferentes veículos de forma padronizada. De acordo com as diretrizes do DNIT, o FEC é uma medida que transforma as cargas de diferentes tipos de veículos em um valor equivalente à carga de referência, frequentemente expressa em termos de um eixo-padrão com uma carga determinada, como por exemplo, 8,2 toneladas. Isso permite uma avaliação mais simplificada e uniforme das solicitações de tráfego sobre o pavimento ao longo de seu horizonte de projeto.

O Fator de Carga (FC) (ou Fator de Equivalência de Carga por Eixo) segundo o DNER (1996) é um coeficiente que, quando multiplicado pelo total de conjuntos de eixos em funcionamento, fornece o número correspondente de conjuntos de eixo equivalente ao padrão estabelecido. Sendo o fator de carga calculado pela equação 054. Enquanto o FEC se refere à relação entre um único conjunto de eixos (simples, duplo ou triplo) e o eixo padrão com roda dupla, o FC está relacionado a todos os conjuntos de eixos em operação na estrada. Assim, o FC representa um FEC ponderado, considerando os diferentes conjuntos de eixos presentes na frota de veículos. Para calcular o FC, o DNER recomenda o uso da Tabela 2, utilizando os FEC_j (Fatores de Efeito de Carga para cada conjunto de eixos de veículos presentes na frota) e seus respectivos percentuais relativos (P_j) para cada conjunto de eixos (SOARES e MOTTA, 2001).

$$FC = \frac{\text{Carga aplicada}}{\text{Capacidade de Suporte da Pavimentação}}$$

(05)

O Fator de Eixo (FE) é definido pelo DNER (1996) como um "valor que, ao ser multiplicado pelo número de veículos, resulta no número de eixos correspondentes". É importante observar que esse conceito, similar ao FC (Fator de Carga), refere-se a todos os eixos em operação na via, sendo, portanto, um conceito associado à frota total de veículos, não a categorias individuais de veículos. A fórmula para o cálculo do FE é expressa como $FE = n/Vt$, onde: n é o número total de eixos na frota e Vt representa o volume total de tráfego na amostragem.

O DNER não esclarece se o termo "eixos", na definição do FE e na variável "n" mencionada, refere-se aos "conjuntos de eixo" (simples, duplo ou triplo) ou aos "eixos individuais". O que impacta no cálculo do FE e, conseqüentemente, no número N, como é detalhado posteriormente. No cálculo do FE, é essencial utilizar o conceito de "conjuntos de eixo" para garantir a compatibilidade com a definição do FC. Esses fatores são multiplicados um pelo outro em uma das formas de determinação do FV (Fator de Veículo), portanto, devem ser calculados seguindo a mesma base conceitual. No entanto, observa-se que a comunidade técnica frequentemente enfrenta dúvidas quanto a essa questão (SOARES e MOTTA, 2001).

Em estudos de tráfego e pavimentação, o termo "fator de veículo" pode referir-se a um parâmetro que quantifica o efeito das cargas dos diferentes tipos de veículos na degradação do pavimento. Sendo o Fator de Veículo (FV) definido como "um número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá, diretamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão" (DNER, 1996).

Pelo método empírico é fundamental a realização do ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou Califórnia BearingRadio (CBR) que é do fator de maior importância para o cálculo de qualquer pavimento (SILVA; SANTOS, 2021). Para se obter a altura do pavimento, considera-se também o CBR de cada camada que deverá compor o pavimento.

2.2.1.2 Cronologia e roteiro da Metodologia DNER

A metodologia aplicada no método empírico foi desenvolvida considerando os seguintes itens e a cronologia da tabela 3:

Tabela 3 – Roteiro da metodologia aplicada no método empírico

	Etapa	Descrição
1	Capacidade de Suporte do subleito	Realizada através do CBR, adotando-se o método de ensaio em corpos-de-prova indeformados ou moldados em laboratórios com condições de massa e umidade específicas.
2	Classificação dos materiais granulares empregados no pavimento	Os materiais utilizados no subleito devem apresentar uma expansão, medida pelo ensaio de CBR, menor ou igual a 2% e um CBR maior ou igual a 2%.
3	Análise de tráfego	O cálculo do número N depende do volume médio diário e volume total de tráfego em um sentido da via. Devido a variação dos tipos de eixos no tráfego rodoviário faz-se necessário admitir um fator de conversão de diferentes eixos para um equivalente de solicitação padrão.
4	Coeficiente estrutural	É um valor que caracteriza os materiais de acordo com a capacidade de cada um deles de resistir a tensões e distribuí-las ao longo de

		sua espessura.
5	Espessura mínima do revestimento asfáltico	É um valor não fixo, que tem como intuito proteger a camada base dos esforços provenientes do tráfego para evitar a ruptura do revestimento.

Fonte: Adaptado de SILVA (2021).

Segundo a metodologia abordada na tabela 3, iniciando pela capacidade de suporte, onde através dos ensaios com os corpos de prova e de sua definição de massa e umidades específicas estuda-se a definição da capacidade de suporte do subleito. Souza (2023) determina esta capacidade através do CBR, relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada (Brita da Califórnia). O valor desta relação é dado em porcentagem. A ideia básica é adotar um Índice Suporte - IS, calculado com média aritmética de dois outros índices derivados, respectivamente, de C.B.R. e do Índice de Grupo – IG. Este índice de suporte, IS, é dado pela equação 06, onde:

- $I_{s_{cbr}}$: índice suporte derivado do CBR (numericamente é o próprio CBR);
- $I_{s_{IG}}$: índice suporte derivado do índice de grupo, correspondendo praticamente a uma inversão de escala, fazendo com que solos de boa qualidade tenham os maiores valores de $I_{s_{IG}}$.

$$I_S = \frac{(I_{s_{cbr}} + I_{s_{IG}})}{2} \quad (06)$$

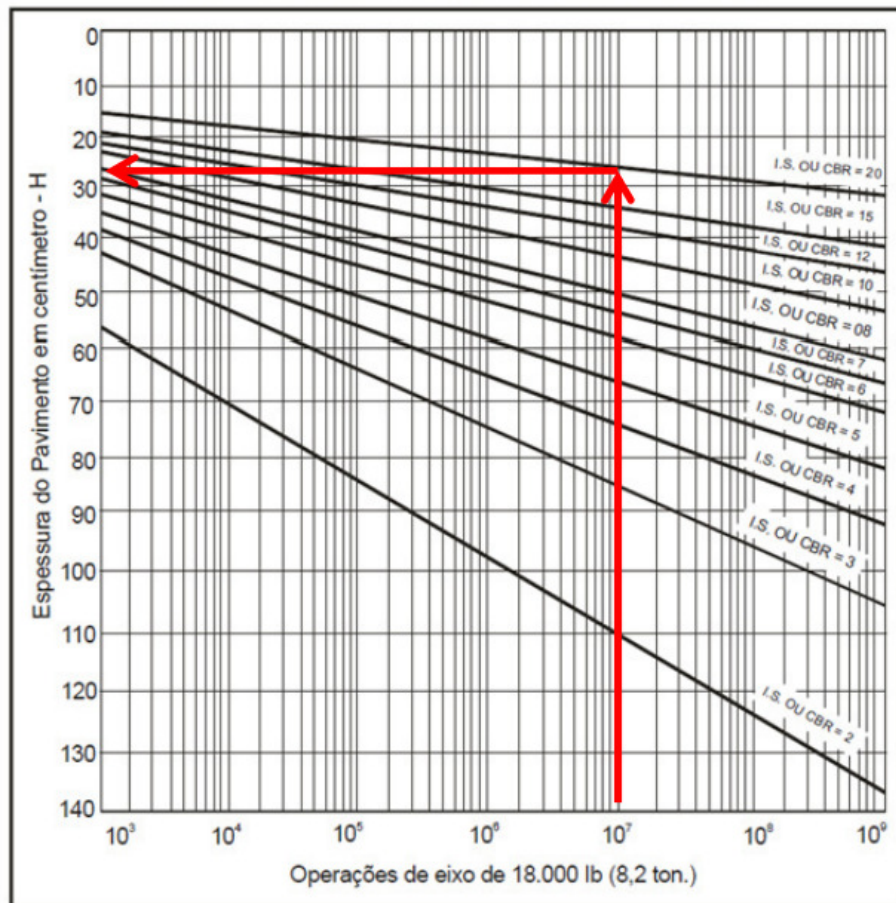
Em seguida na metodologia abordada na tabela 01 na definição de materias é necessário atentar se às exigências mínimas dos materiais granulares. SILVA (2021) considera para materiais de reforço do subleito, sub-base, e base estabilizada são:

- Reforço do subleito: características geotécnicas superiores a do subleito (CBR, LL, LP, granulometria) e expansão $\leq 1\%$;
- Sub-base granulometricamente estabilizada: CBR ≥ 20 ; IG = 0 para qualquer tipo de tráfego e expansao $\leq 1\%$;

- Base estabilizada granulometricamente: $LL \leq 25\%$; $IP \leq 6$; Expansão $\leq 0,5\%$.
Equivalente de areia $\geq 30\%$; CBR ≥ 60 (médio); ≥ 80 (pesado).

Abordando de forma geral a análise de tráfego, coeficiente estrutural e espessura mínima do revestimento descritas na tabela 01, Souza (2023), afirma que a espessura total de pavimento é dada em função do N e da capacidade de suporte em termos de base granular ($K = 1,00$). Entra-se com o valor de N na abscissa e traçasse uma reta vertical até atingir o valor de suporte em causa. Ordenada correspondente é a espessura do pavimento necessária para proteger um material com o CBR utilizado. Conforme ilustrado na figura 03.

Figura 4 - Determinação de espessuras do pavimento



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

Fonte: SOUZA (2023).

Quanto à classificação dos materiais granulares empregados no pavimento vale ressaltar que, algumas questões a respeito destas faixas devem ser

consideradas como a fração passante na peneira nº 200 sendo inferior a 2/3 da fração passante na peneira nº 40. Em relação à fração graúda, essa deve apresentar um desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50%. Para materiais com experiência de uso pode se adotar valores de desgaste maior (SILVA, 2021).

Líquido (2017) em seu estudo permeando a técnica de ensaios Los Angeles descreve que a resistência está ligada à sua dureza, densidade e módulo de elasticidade, utilizando os testes de resistência ao desgaste por abrasão usando a máquina de Los Angeles. Ao fim o teste revela o percentual de agregado graúdo que sofrerá em condições de atrito contínuo das Partículas e das esferas de aço. O que revela se o agregado graúdo a ser usado é apropriado para o projeto.

Este método se baseia praticamente nas características do solo de fundação, dos materiais que o constitui, no tráfego e prevê apenas o uso do asfalto puro na pavimentação das rodovias brasileiras, não considerando as novas tecnologias adotadas atualmente para pavimentos flexíveis, também não prevendo o surgimento de possíveis patologias, como rachaduras ou trincas com o passar dos anos devido a utilização e nível de tráfego nas rodovias (SILVA; BARBOSA, 2021).

2.2.2 Método Mecanístico (Medina)

Entende-se por método mecanístico aquele que utiliza uma teoria que prevê as tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima na estrutura do pavimento, correlacionando a resistência dos materiais empregados (SILVA; BARBOSA, 2021).

A análise de uma estrutura e dimensionamento de um pavimento exige um conglomerado de informações para que os resultados esperados sejam confiáveis (SILVA; SANTOS, 2021). Seguindo este apontamento o método mecanístico faz uso de teorias que possibilitem seus uso de forma confiável.

De acordo com França (2018), no ano de 2018, seria aplicado nas rodovias nacionais, por parte do DNIT, um novo método de pavimentação asfáltica, desenvolvida pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe), o qual auxiliaria na escolha mais eficiente do ligante utilizado nas diferentes situações encontradas.

O Método Medina é um método de cálculo que realiza a verificação e o dimensionamento mecânico de estruturas de pavimentos, por meio da rotina de “Análise Elástica de Múltiplas Camada ” (SILVA; SANTOS, 2021).

Ferreira (2021) enfatiza que esse método mecânico possibilita tanto o dimensionamento de novas rodovias, quanto a manutenção das já existentes, indicando, dessa forma, a espessura ideal de cada camada e o tipo de material a ser empregado.

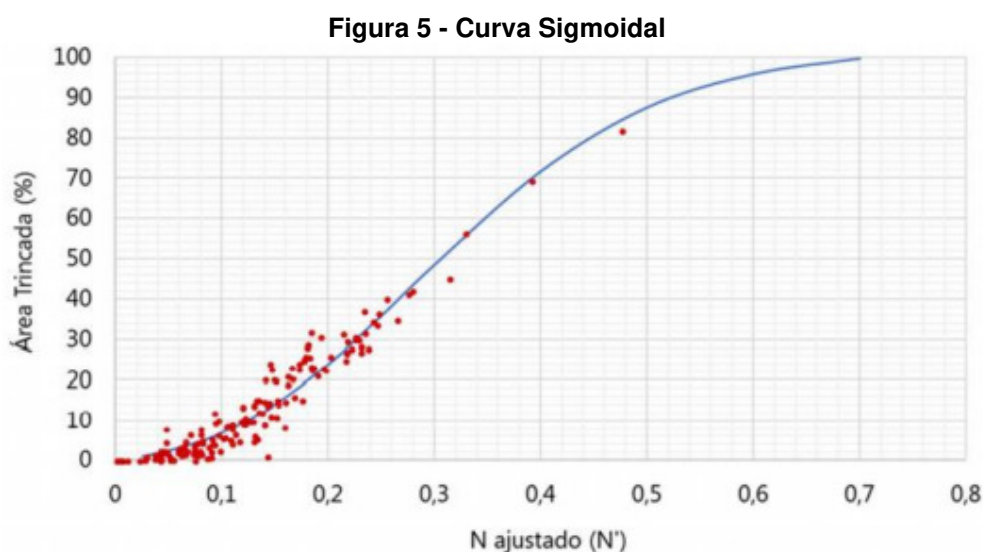
Para a execução do método, Pitangui (2019) afirma que se faz necessário definir a estrutura do pavimento, alimentando o programa com as características dos materiais de cada camada, além de definir o tráfego dado pelo número equivalente N, que é o fator de multiplicação para minimizar o erro entre a evolução da área trincada com a curva sigmoide padrão. As especificações das camadas compreendem informações detalhadas sobre os materiais utilizados, como espessura, composição, resistência, e outras características relevantes para cada estrato do pavimento.

Abordando a curva sigmoide, ou curva mestra, Santos (2020) descreve como sendo o resultado da aplicação dos fatores de translação para a temperatura de referência, usualmente adotada de 20°C (temperatura intermediária de ensaio). A curva mestra de módulo, combinada com os fatores de translação tempo-temperatura, permite a determinação de valores de rigidez para diferentes combinações de temperatura e frequência de carregamento (velocidade de tráfego). A "curva mestra de módulo" conforme ilustrado na figura 05 é uma representação gráfica que mostra a relação entre o módulo de elasticidade (também conhecido como módulo de deformação ou módulo de resiliência) de um material asfáltico e a temperatura. É importante ressaltar que a rigidez das misturas asfálticas pode variar teoricamente de cerca de 40 MPa (em temperaturas elevadas e baixa velocidade) a aproximadamente 40.000 MPa (em temperaturas baixas e alta velocidade), em função dos módulos de equilíbrio e das condições de temperatura e frequência de carregamento, segundo dados de Doe, 2015.

Pitangui (2019) ressalta ainda que, é possível obter uma análise pura, através da qual o programa realiza os cálculos sem alterar a espessura de cada camada estudada, e o dimensionamento do pavimento de fato. Vale ressaltar que

um desempenho ideal provém de uma calibração e validação dos resultados (FRANCO; MOTTA, 2018).

No Método Medina o reajuste da calibração tem como intuito definir a curva sigmoideal para representar de forma mais adequada a evolução da área trincada dos segmentos monitorados (FRITZEN, 2016). Na figura 4 esta ilustrado um exemplo desta curva sigmoideal.



Fonte: DNIT (2020).

Os modelos utilizados no programa Medina mostram-se sensíveis a pequenas variações do Número N, e, portanto, uma estimativa apurada é de grande importância para o sucesso do projeto (FRANCO, 2018).

Silva e Santos (2021) concluem que o método mecanístico-empírico em que o Medina é baseado, realiza o dimensionamento buscando minimizar a fadiga do revestimento. Eles destacam como objetivo realizar o dimensionamento de alguma estrutura com foco na minimização de dois problemas específicos: fadiga do revestimento, que se refere ao surgimento de trincas, e deformação das camadas do pavimento, que está relacionada ao afundamento ou deformação das camadas que compõem a estrutura do pavimento.

2.3 Critérios de Fadiga de Pavimentos

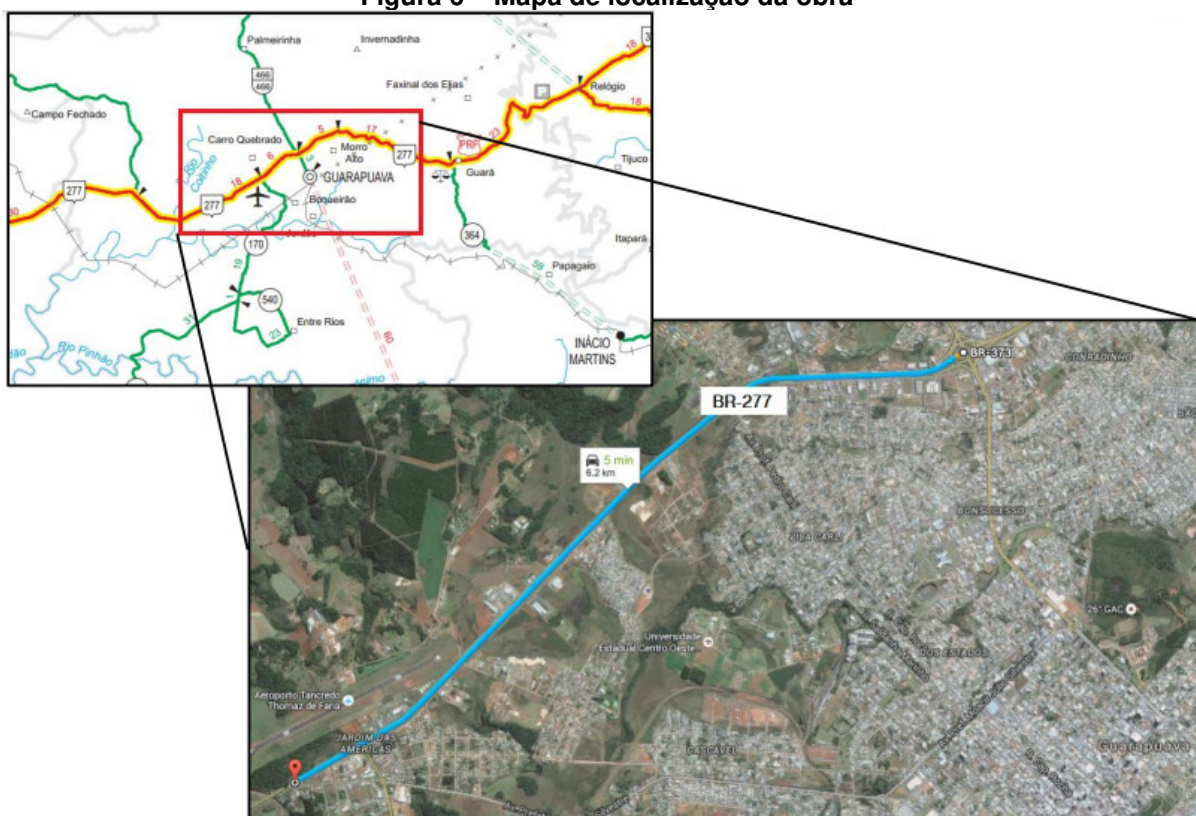
As cargas exercidas sobre um pavimento flexível geram tensões significativas de tração na parte inferior das camadas betuminosas e tensões verticais de compressão no topo do solo de fundação. Controlar esses esforços em condições críticas é a base dos critérios de falha, usados para dimensionar esses pavimentos, como o critério de fadiga que monitora a extensão radial de tração e o critério de deformação permanente que controla a extensão máxima de compressão. A ultrapassagem desses limites compromete a qualidade dos pavimentos, ameaçando suas exigências estruturais e funcionais ao longo de sua vida útil (ALMEIDA-COSTA e BENTA, 2014).

A resistência à fadiga de um revestimento é a capacidade de suportar repetidos esforços de flexão sem falhar, determinada pela relação entre tensão, extensão inicial e o número de ciclos que levam à falha. A falha por fadiga ocorre quando a tensão máxima em cada ciclo de carga é inferior à tensão de ruptura da mistura betuminosa (MB) para uma única aplicação de carga. Esse tipo de falha é identificado pelo surgimento de trincas na região percorrida pelas rodas, propagando-se da base das camadas betuminosas até a superfície. Esse fenômeno é influenciado por diversas variáveis da MB, como a granulometria, a quantidade e a rigidez do betume, bem como o grau de compactação (Silva, 2006).

3 METODOLOGIA

A estrutura de pavimento posta como objeto de estudo para esta pesquisa corresponde às obras de duplicação da rodovia BR-277, entre os municípios de Guarapuava e Foz do Iguaçu, mais especificamente nos Km 344 ao km 350+200m, no município de Guarapuava, estado do Paraná, com extensão de 6,20 km (Figura 6).

Figura 6 – Mapa de localização da obra



Fonte: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (2015).

3.1. Método Empírico utilizado na pavimentação

Inicialmente, efetuou-se a análise do documento disponibilizado pelo Departamento de Estradas de Rodagem (DER) intitulado “Projeto Executivo para Implantação da Duplicação da BR-277 do Km 344+000 ao Km 350+200 – Trecho de Guarapuava” (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM, 2015). Documento este disponível para download na plataforma “Documentador” do governo do Paraná.

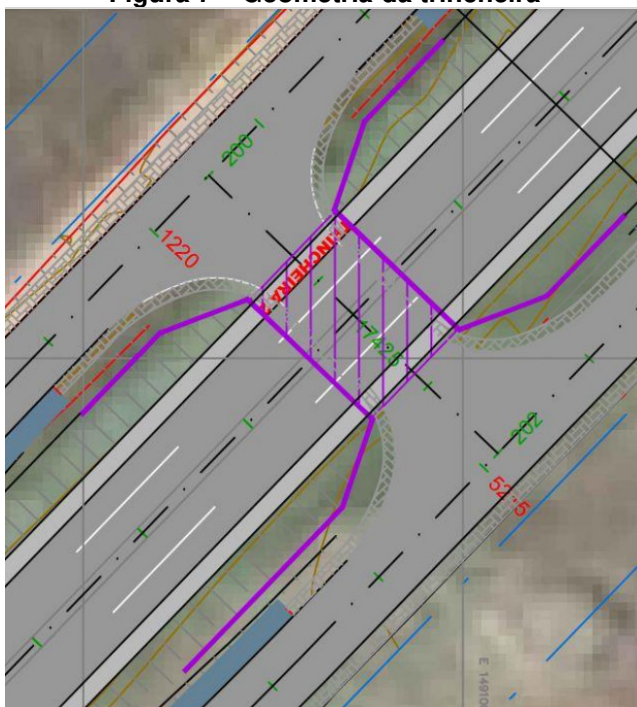
Pavimentação esta que se trata de uma extensão do traçado já existente, efetuando a ampliação da rodovia no local. Ao mesmo tempo houve também a implementação de trincheiras e detalhamentos especiais do projeto quanto ao acabamento. Dados técnicos do traçado podem ser observados na tabela 4 diretamente retirados do relatório do projeto analisado.

Tabela 4 – Dados Gerais da Pavimentação Analisada

A área total de pavimento novo a implantar na Rodovia e acessos	75.031,00 m ²
A área total de acostamento novo a implantar na Rodovia	20.615,00 m ²
A área total de recapeamento a executar na Rodovia	45.414,00 m ²
A área total de pavimento novo a implantar na Marginal Direita	50.911,00 m ²
A área total de pavimento novo a implantar na Marginal Esquerda	41.758,00 m ²
A área total de revestimento a implantar nas OAEs	2.813,00 m ²

Fonte: Adaptado de DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (2015).

A seção-tipo da pista dupla implementada possui uma largura total de 21,20 metros, sendo composta por quatro faixas de tráfego, cada uma medindo 3,60 metros, dois acostamentos externos com 2,50 metros de largura, dois acostamentos internos de 0,60 metros de largura cada e uma barreira de concreto central com 0,60 metros de largura. É importante notar que, devido às necessidades de superlargura em trechos de curva, a largura máxima da seção-tipo pode aumentar para 22,30 metros, sendo atingida no trecho com raio de curvatura de 350 metros. Na figura 7 está ilustrada uma das trincheiras do trecho, onde está representado um trecho principal entre faixas de 17,45 metros devido a particularidade da trincheira, mais acostamentos de 0,60 metros laterais.

Figura 7 – Geometria da trincheira

Fonte: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (2015).

Seção-tipo das marginais contam com uma plataforma acabada com largura total de 14,00 metros, composta por duas faixas de tráfego opostas, cada uma medindo 4,50 metros (totalizando 9,00 metros), um passeio com 2,00 metros de largura e uma ciclovia com 3,00 metros de largura. Na figura 8 é possível observar a execução desta rodovia.

Figura 8 - Duplicação da BR-277 - Guarapuava

Fonte: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (2021).

No dimensionamento desta rodovia, utilizou-se de ensaios de caracterização simples e que dispensam aparelhagem sofisticada. Para tanto, foi realizado pela Concessionária Ecorodovias estudo de tráfego em agosto de 2014 para o trecho em projeto de implantação da duplicação, visando utilização destes dados para o dimensionamento adequado já considerando a expansão de fluxo projetada.

Para estimar as taxas de crescimento projetadas, foram levados em consideração diversos fatores, incluindo o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, o aumento na frota de veículos e as correlações com outras taxas de crescimento estabelecidas em estudos recentes de tráfego realizados no estado do Paraná. A concessionária definiu taxas de crescimento de 3% para ônibus e caminhões para um período de projeção de 10 anos, com a abertura do tráfego a partir de 2015.

3.2. Método Medina simulado na pavimentação estudada

Para funções de cálculo e simulação foram utilizados os mesmos dados retratos no relatório de obra do DER: Projeto Executivo para Implantação da Duplicação da BR-277 do Km 344+000 ao Km 350+200 – Trecho de Guarapuava” (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM, 2015). A partir deles iniciou-se a modelação no software, é possível a realização de dois modos de dimensionamento: projeto de reforço e projeto de pavimento novo. Como se trata de uma expansão de um pavimento simples, passando a ser pista dupla, não é condizente considerar apenas como um reforço, visto que parte significativa do pavimento não existia inicialmente. A figura 8 demonstra a tela inicial do software.

Figura 9 – Tela inicial do MeDiNa

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Emerson Mendes EMPRESA: Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PROJETO: Implantação de duplicação da BR-277 do km 344+000 ao km 350+200 MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

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

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: Autoria Própria (2023).

Seguindo a mesma metodologia de Pitangui (2019), o processo de dimensionamento de um novo pavimento utilizando o software MeDiNa envolve a determinação da estrutura do pavimento, inserindo as especificações dos materiais em cada camada, incluindo suas respectivas espessuras. Sendo estas as camadas: 1 - concreto asfáltico; 2 – material granular; 3 solo fino, silvoso ou argiloso; SL – subleiro.

Além disso, é fundamental definir o tráfego, que é quantificado pelo conceito de Número Equivalente (Número N). O Número N, sendo uma representação quantitativa da carga repetitiva exercida pelo tráfego em estruturas de pavimentação ao longo do tempo leva em consideração o volume de tráfego e a distribuição das cargas ao longo do eixo da estrada. Permitindo assim estimar o dano acumulado nas camadas do pavimento devido ao tráfego. Existe a opção de calcular o Número N usando o software ou inserir as informações já calculadas previamente. Como trata-se de uma comparação com um projeto já calculado, todos eles já incluem o Número N calculado, simplificando o processo ao apenas requerer a inserção das

informações no programa, conforme ilustrado afrente nas figuras 10, 11, 12 e 13 em resultados. Seguindo assim desta forma para esta análise.

Após a entrada de dados relacionados à estrutura e ao tráfego, é possível realizar duas formas de análise: uma análise inicial, que avalia o desempenho da estrutura com base nos dados fornecidos, sem fazer alterações na espessura das camadas pré-determinadas. Nesse caso, o software faz os cálculos e verifica se os critérios relacionados a trincas na superfície e deformação permanente são atendidos, fornecendo um resumo para a avaliação do projetista. Por outro lado, na segunda opção, ao selecionar a camada que desejamos dimensionar, o programa nos indica a espessura necessária para o projeto.

O aplicativo utiliza modelos de dimensionamento estrutural, como o método de elementos finitos, para simular o comportamento do pavimento sob diferentes cargas e condições. Esses modelos consideram a interação entre as camadas do pavimento, a capacidade de carga do solo de fundação e as características de deformação dos materiais.

Neste estudo, nutriu-se o programa com os dados disponíveis no relatório da obra considerado no estudo de caso e, posteriormente, a análise da estrutura apresentada. A avaliação teve como foco verificar se os critérios relativos à formação de trincas na superfície e à deformação permanente, calculados pelo MeDiNa, atenderam aos requisitos dos projetos analisados. Quando a espessura proposta não estava em conformidade com os critérios do MeDiNa, realizou-se o dimensionamento da camada de revestimento asfáltico.

Ressalta-se que a aplicação do método de Medina requer cuidado e análise crítica de suas premissas, limitações e das condições reais da estrada. Tais considerações são essenciais para garantir a precisão e a adequação do dimensionamento do pavimento

3.2.1. Análise e Dimensionamento

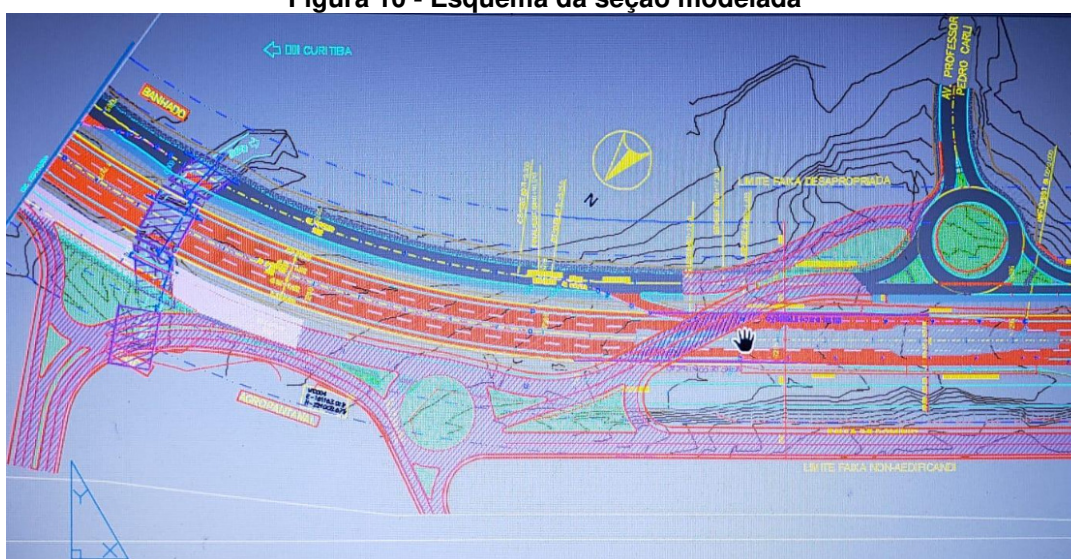
Considerando que um projeto de implantação de pavimento novo envolve diversos subprojetos, como drenagem, tráfego, pavimentação, entre outros, o processo de compilação essencialmente consistiu em escolher as informações solicitadas pelo MeDiNa e organizá-las de maneira a facilitar o subsequente

dimensionamento. É importante ressaltar que os projetos são únicos em sua natureza, o que justifica a ausência de algumas informações em todos os projetos, em sua totalidade. A figura 9 ilustra o esquema da seção modelada estudada.

Assim, as informações coletadas foram resumidas nos seguintes itens:

- O método de dimensionamento utilizado;
- O Número N;
- O período de projeto;
- As camadas da estrutura e suas respectivas espessuras;
- Os principais dados do projeto relacionados aos materiais de cada camada.

Figura 10 - Esquema da seção modelada



Fonte: GMais Notícias (2021).

A partir dos resultados encontrados no memorial da obra as tabelas 5, 6 e 7 foram elaboradas para posterior aplicação no software.

Tabela 5 - Resumo de informações da BR-277 - KM 344+100 A 346+000

Rodovia	Informações Gerais	Métodos utilizados	Número N	Período de Projeto (anos)
BR-277	KM 344+100 A 346+000	Método DNER	3.11E+07	13
Camada	Espessura (cm)	Material indicado pro projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no MeDiNa
Revestimento Asfáltico (1ª camada)	5,00	CBUQ Faixa Caltrans D	Concreto Asfáltico Modificado	RP CAP 50/70 #19,1mm Setetiba
				RP CAP 50/70

Revestimento Asfáltico (2° camada)	7,50	Binder Faixa DNIT B	Concreto Asfáltico Modificado	#19,1mm Sepetiba
Base	15,00	Brita Graduada Simples	Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	Brita Graduada – Gnaisse CS
Sub-Base	15,00	Macadame Seco	Solo fino siltoso ou argiloso	Solo Argiloso LG'(1)
Subleito	20,00	Solo Laterítico	Sub leito	Solo Siltoso NS'

Fonte: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (2015).

Tabela 6 – Resumo de informações da BR-277 - KM 346+000 A 350+100

Rodovia	Informações Gerais	Métodos utilizados	Número N	Período de Projeto (anos)
BR-277	KM 346+000 A 350+100	Método DNER	2.98E+07	13

Fonte: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (2015).

Tabela 7 – Resumo de informações da BR-277 - VIA MARGINAL KM 344+100 A 350+000

Rodovia	Informações Gerais	Métodos utilizados	Número N	Período de Projeto (anos)
BR-277	VIA MARGINAL KM 344+100 A 350+000	Método DNER	2.77E+06	13

Fonte: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (2015).

3.2.2 Roteiro da Metodologia Medina

Os métodos de dimensionamento de pavimentos de acordo com os princípios propostos por Medina envolvem uma abordagem técnica detalhada para garantir a adequação e a durabilidade das estradas. Através da tabela 8 é ilustrada o roteiro de dimensionamento pela metodologia Medina, seguindo a metodologia abordado por Alves (2022). Para determinar a estrutura do pavimento, é fundamental que o projetista forneça ao software as especificações de cada camada presente na composição do pavimento. O programa oferece inicialmente um modelo padrão de pavimento apenas como uma referência para auxiliar no preenchimento dos dados necessários, mas não como uma estrutura definitiva.

Tabela 8 – Roteiro de Metodologia de dimensionamento de pavimentos pelo método Medina

Etapa	Descrição
Coleta de dados	Iniciar com a obtenção de informações precisas, como dados de tráfego (volume, tipo de veículos, carga), a partir disso definir o número equivalente de eixo, número N.
Classificação do tráfego	Analisar e classificar os veículos que trafegam na via, considerando o número de eixos, distribuição de cargas, efeitos dinâmicos, entre outros fatores.
Dimensionamento das camadas do pavimento	Determinar as espessuras adequadas das camadas do pavimento (base, sub-base, revestimento) com base nos resultados da análise estrutural e no Índice Estrutural calculado.
Elaboração do projeto final	Com base nos parâmetros analisados, desenvolver o projeto final do pavimento, incluindo especificações técnicas, detalhes construtivos e materiais a serem utilizados.
Validação com normas e especificações	Verificar a conformidade dos resultados obtidos com as normas técnicas e especificações relevantes, assegurando a qualidade e segurança do projeto.

Fonte: Adaptado de ALVES (2022).

Alves (2022) descreve que no programa MeDiNa, versão 1.1.5, os materiais são categorizados, como descrito no manual do software.

- 1) **Materiais asfálticos:** O software apresenta três tipos: camadas asfálticas convencionais, camadas com asfalto modificado por polímeros e misturas com borracha. O banco de dados do programa inclui misturas asfálticas provenientes de testes realizados na COPPE, usadas para calibrar a função de transferência. Também estão disponíveis misturas de referência, utilizadas como guia quando não há informações completas sobre o projeto.
- 2) **Materiais Granulares; Solos finos, Siltosos e Argilosos:** As camadas compostas por materiais granulares devem ter espessura entre 10 e 40 cm. Esses materiais são representados em termos de módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e deformação permanente, conforme esclarecido no manual de ajuda. Diferentemente de outras camadas, essa não é avaliada considerando o dano por fadiga. O quadro 1 apresentado por Pitangui (2019) traz os modelos de material considerados pelo MeDiNa.

- 3) Subleito: São representados pelo módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e deformação permanente. Para calcular essa última característica, o manual orienta o uso do estado de tensões calculado nos pontos sob a roda e entre as rodas, a uma profundidade de 25 cm no subleito. A deformação permanente resulta da soma das deformações de cada camada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise segundo os métodos do DNER e Medina

4.1.1. Aplicando o Método MeDiNa

Partindo para a análise e dimensionamento no software Medina seguiu-se as informações de acordo com as tabelas 3,4 e 5 criando um arquivo de pavimento novo para cada. Foram selecionadas as camadas e seus respectivos materiais com a devida espessura.

Iniciando com o BR-277 - KM 344+100 A 346+000 tem-se o lançamento no software ilustrado na figura 10.

Figura 11 – Simulação MeDiNa BR-277 - KM 344+100 A 346+000

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Emerson Mendes EMPRESA: UTFPR

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	5	9588	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	7,5	9588	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	15,0	381	0,35
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	15,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	85205
FV:	1,000
N anual (1º ano):	3,11e+07
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	3,11e+07
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	13
N Total:	4,04e+08

Período de projeto (anos):
Período de projeto para o dimensionamento do pavimento em anos (1 a 20).

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

Nível de confiabilidade da análise: 85%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%
Afundamento de Trilha de Roda: 3,7mm

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

Fonte: Autoria Própria (2023).

Para esta análise são considerados 3 trechos desta rodovia, de acordo com o adotado pelo relatório da obra executado, sendo eles os representados anteriormente e que tem seus resumos de informações representados nas tabelas 3, 4 e 5. Na primeira análise da BR-277 nos trechos KM 344+100 a 345+000 com

resultado da análise com 85% de confiabilidade, relevou o resultado de 99,0% de área trincada estimada do pavimento no fim do período com os dados levantados a partir do relatório de obras, um afundamento de trilha de roda de 3,7 mm e um alerta de tráfego elevado para a estrutura proposta. O que reflete em um resultado não adequado para as características mínimas exigidas pela via, de forma a manter área trincada dentro dos limites adequados.

A partir disso, passou-se a realizar diferentes simulações a fim de atender aos quesitos mínimos exigidos para uma via desta apresentar segurança. Alterando a via para um sistema arterial secundário, sendo assim um reparo e não uma nova via, mesmo não sendo o cenário real, visto que diversas partes da via precisam de expansão, ou seja, serão completamente novas, mesmo em tal cenário os resultados permanece apontando área trincada estimada em 99% e 3,3 mm de afundamento de roda, conforme ilustrado na figura 11. Estes resultados apontam que praticamente toda a área da pavimentação analisada apresenta algum tipo de trinca ou fissura após o período do projeto. Essas trincas podem ser de diferentes tipos, como trincas por fadiga, termocontratadas, reflexão de trincas, entre outras, e podem variar em largura e comprimento. Quanto à taxa de afundamento mostra-se como um indicador de problemas na capacidade estrutural da pavimentação, como compactação inadequada, deformação do subleito ou até mesmo falhas na camada asfáltica.

Figura 12 – Simulação MeDiNa BR-277 - KM 344+100 A 346+000 considerando sistema arterial secundário

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	Entre com os dados dos materiais	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	5	9588	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	7,5	9588	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisee C5	15,0	381	0,35
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	15,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO		--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---	
DADOS DO TRÁFEGO		Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Secundário	Nível de confiabilidade da análise: 75%	
VMD (1º ano):	85205	Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%	
FV:	1,000	Afundamento de Trilha de Roda: 3,3mm	
N anual (1º ano):	3,11e+07	--- ALERTAS ---	
% Veículos na faixa de projeto:	100	Tráfego elevado para a estrutura proposta.	
N Anual da faixa:	3,11e+07		
Taxa de crescimento (%):	0,0		
Período de projeto (anos):	13		
N Total:	4,04e+08		

Fonte: Autoria Própria (2023).

Realizando mais uma simulação buscando a adequação ao padrão desejado para o pavimento buscando a otimização máxima com espessura de 15 centímetros para todas as câmaras ainda se obteve como resposta da análise uma área trincada estimada do pavimento de 65,6%, com nível de confiabilidade da análise: 95% e afundamento de Trilha de Roda: 1,2mm. E exibindo o alarme de tráfego elevado para a estrutura proposta.

Ao se aplicar o método para os outros 2 trechos os resultados exibidos também não se mostram satisfatórios conforme figuras 12 e 13.

Figura 13 - Simulação MeDiNa BR-277 - KM 346+000 A 350+100

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	5	9588	Entre com os dados dos m
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	7,5	9588	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	15,0	381	0,35
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	15	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	81644
FV:	1,000
N anual (1º ano):	2,98e+07
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	2,98e+07
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	13
N Total:	3,87e+08
N anual (1º ano): Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano)	

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---	
Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.	
Nível de confiabilidade da análise: 95%	
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%	
Afundamento de Trilha de Roda: 4,5mm	
--- ALERTAS ---	
Tráfego elevado para a estrutura proposta.	

Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 14 - Simulação MeDiNa BR-277 - VIA MARGINAL KM 344+100 A

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	5	9588	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	7,5	9588	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	15,0	381	0,35
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	15	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

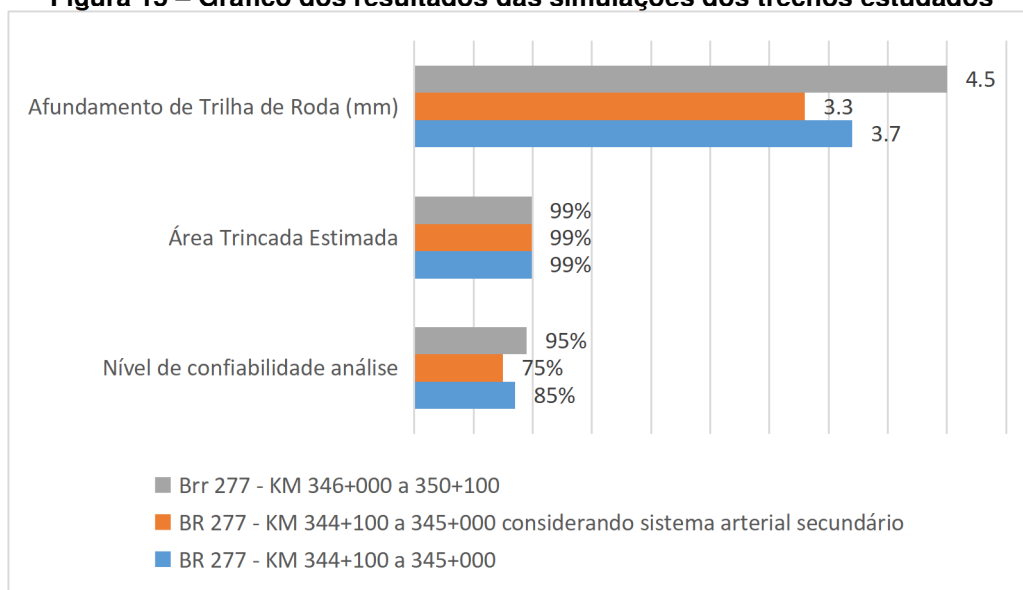
EIXO PADRÃO RODoviÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	7589
FV:	1,000
N anual (1º ano):	2.77e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	2.77e+06
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	13
N Total:	3.60e+07
N anual (1º ano):	
Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano)	

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---	
Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.	
Nível de confiabilidade da análise: 95%	
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%	
Afundamento de Trilha de Roda: 3,8mm	
--- ALERTAS ---	
Tráfego elevado para a estrutura proposta.	

350+000

Fonte: Autoria Própria (2023).

Conforme evidenciado pelas imagens apresentadas, em todos os cenários, ao término do período de projeto, de 13 anos, o pavimento exibe falhas por fadiga no revestimento asfáltico, atingindo um nível de trincamento de 99,0% no primeiro cenário em todos os trechos da BR-277 analisados. Ao se analisar o afundamento na trilha de roda, os valores se mantêm dentro dos limites aceitáveis, não indicando problemas de deformações permanentes. No entanto, ao examinar a área trincada, fica evidente que o pavimento analisado está subdimensionado, conforme podemos observar na figura 14 onde todos os resultados estão acima de 75% de área trincada estimada.

Figura 15 – Gráfico dos resultados das simulações dos trechos estudados

Fonte: Autoria Própria (2023).

4.1.2. Análise segundo o Método DNER

Já quando analisamos os resultados encontrados através dos cálculos executados através do Método DNER 1966/1981, onde ao se executar todos os cálculos de espessura passou por um reforço no subleito Macadame Seco com 20,0 cm de espessura e expansão de 0% em substituição aos últimos 20 cm da camada final de terraplenagem (CFT). Resultando nos valores:

- $H_{20} = B + R = 28,37$ cm
- $B > 8,37$ – resultando em base de BGS com espessura igual a 12,0cm – $B = 12,0$ cm
- $H_{20} > 10,95$ - adotou-se: Sub-base de BGS com espessura de 12,0cm – 2 = 12,0 cm
- $h_n > 0,62$ – optando-se por reforço de subleito de Macadame Seco com 20,0 cm de espessura e expansão de 0% em substituição aos últimos 20 cm da camada final de terraplenagem (CFT).

Cálculos estes que ao se passar para a análise de Fadigas dos Materiais exibiram deformações das misturas asfálticas limites superiores às deformações

características conforme representadas nas equações abaixo, calculando a fadiga quanto às deformações das misturas asfálticas, retiradas do relatório do DER analisado da BR-277/PR.

$$RVB = \frac{Vb}{Vv + Vb} = 0,78 \quad (07)$$

Sendo:

RVB = Razão de Volume de Bolso.

Vb = Volume de Bolso.

Vv = Volume de Vazio.

$$M = 4,84 * \{[0,78] - 0,69\} = 0,44 \quad (08)$$

$$\alpha = 45 * 10^{0,43} * 4,325 * 10^{-3} * \left(\frac{0,06894}{40000}\right)^{0,854} = 6,35 * 10^{-6} \quad (09)$$

$$N = 2,77 * 10^6 \quad (10)$$

$$\varepsilon t (\text{limite}) = (5,83 * 10^{-6})^{\frac{1}{3,291}} * (2,77 * 10^6)^{\frac{-1}{3,291}} = 2,91 * 10^{-4} \quad (11)$$

A partir da análise do ELSYM5, que é um software utilizado para verificação mecânica, sendo o mais utilizado no Brasil, onde analisa as tensões, deformações e os deslocamentos para um certo carregamento imposto na estrutura. A partir deste software foi obtido o εt (*caract.*) como a deformação principal PE1 na camada $z = 10,00$ cm é igual a $2,32 * 10^{-4}$. Portanto:

$$\varepsilon t (\text{limite}) = 2,91 * 10^{-4} > 2,32 * 10^{-4} = \varepsilon t (\text{caract}) \quad (12)$$

Além disso, a análise de Fadiga quanto as deformações de compressão do subleito, de acordo com a equação 08 e os parâmetros adotados, $a = 0,0105$, $b = -0,223$, N número de solicitações de tráfego pelo método AASHTO = $2,77 * 10^6$.

$$\varepsilon v (\text{limite}) = a * N^b = 0,0105 * (2,77 * 10^6)^{-0,223} = 3,84 * 10^{-4} \quad (13)$$

A partir da análise do ELSYM5, foi obtido o εt (*caract.*) no programa como a deformação principal PE3 na camada $z = 54,00$ cm é igual a $1,88 * 10^{-4}$. Portanto:

$$\varepsilon t (\text{limite}) = 3,84 * 10^{-4} > 1,88 * 10^{-4} = \varepsilon t (\text{caract}) \quad (14)$$

4.1.3. Comparação entre os métodos

Ao fim da comparação temos dois diferentes cenários, o dimensionamento pelo método MeDiNa, onde os resultados se mostraram incompatíveis com o recomendado, com resultados para todas as simulações como tráfego elevado para a estrutura proposta. Em contra partida a partir de todas as verificações o método DNER 1966/1981 respeitou a deformação limite.

Analisando as divergências de resultados encontradas Camargo Junior aponta que métodos computadorizados apresentam algumas limitações de metodologia, podendo não ser adequados para todas as situações. Em métodos que envolvem cálculos complexos ou programas de computador, erros na implementação podem resultar em resultados inconsistentes. Vindo de encontro com os resultados encontrados.

5 CONCLUSÕES

A partir das comparações dos dois formatos de dimensionamento e de suas avaliações pode-se observar que não foi possível atender de maneira eficiente ao dimensionamento do pavimento através do método MeDiNa, devido a refletir num sub-dimensionamento para o trecho, incapaz de atender à necessidade solicitada no trecho devido ao fluxo de veículos, algumas das limitações de espessura do software contribuíram para tal como aproximações que foram necessárias serem feitas.

Enquanto que no modelo de dimensionamento inicialmente proposto e executado na rodovia foi capaz de atender a todos os quesitos mínimos de segurança. Isso demonstra a necessidade de análise individualizada para cada um dos casos de dimensionamento da pavimentação. Sendo neste caso preferível a utilização do método empírico.

Ao se observar os resultados obtidos com o método Medina e o método do DNER vê-se neste caso uma incompatibilidade de exigências mínimas para o método Medina atender ao dimensionamento. Refletindo assim na necessidade de readequação do método para que em trabalhos futuros possa ser utilizado. Sendo pontos a serem observados: a atualização de parâmetros (parâmetros usados no Método de Medina estão atualizados e são representativos das condições atuais de tráfego, materiais e ambiente), uso de modelagem avançada (como modelagem numérica ou análise mecanicista-empírica, para complementar as previsões do Método de Medina, o que permite considerar de forma mais detalhada o comportamento dos materiais e as interações com o tráfego e as condições ambientais), consideração de fatores adicionais (como variabilidade de solo, variações climáticas extremas ou características do tráfego que podem não ser totalmente capturadas pelo Método de Medina) e por fim a avaliação de sensibilidade com análises de sensibilidade para identificar quais parâmetros têm maior influência nos resultados do Método de Medina.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA-COSTA, A.; BENTA, A. **Fadiga em pavimentos rodoviários flexíveis; uma abordagem experimental**. Congresso Nacional de Mecânica Experimental, 2014.
- ALMEIDA, S. B. S. **Utilização de material proveniente de fresagem na composição de camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis**. Tese de Conclusão de Curso da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG 2019.
- ALVES, B. M.; et al. **Comparativo entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis DNIT e MeDiNa**. 2022.
- AMARAL, P. O.; et al. **Patologias em pavimentos flexíveis**. Revista GeTeC, v. 10, n. 30, 2021.
- BALBO, J.T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007
- BERNICCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 3ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.
- BRAGA, F. S. S.; et al. **As patologias dos pavimentos flexíveis**. Cadernos de Graduação, v. 5, n.9, 2021.
- CARVALHO, R. S. **Aspectos socioeconômicos da evolução da pavimentação no Brasil. História da Engenharia Rodoviária**, 20(1), 33-50, 2018.
- CAMARGO JUNIOR, J. B. **Metodologia de análise de risco em sistemas computacionais de aplicação crítica**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2002.
- CCR NOVADUTRA. **Rodovia Presidente Dutra: 60 anos de história**. 2011.
- CIPRIANO, L. F.; LIMA, R. C. S.; SILVESTRE, K. C. C. Estudo comparativo de pavimento rígido x pavimento flexível através da análise de solo na PB 008. **Revista Acta Scientia**, v.3, n. 2, 2021.
- CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2021**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2021.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DER. **Projeto executivo para implantação da duplicação da Br-277 do Km 344+000 ao Km 350+200 – Trecho de Guarapuava**. Projeto Executivo de Pavimentação. 2015.
- DOE, J. **Propriedades mecânicas das misturas asfálticas**. Revista de Engenharia Civil, 20(4), 112-125, 2015.

DNIT. **Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa.** Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Convênio UFRJ/DNIT, 2020.

Estradas de Ferro e Rodagem - Abrelpe. São Paulo: Abrelpe, 2007]

EIRAS, D. H. M.; et al. **A importância da composição da massa asfáltica para um bom desempenho.** Revista Teccen, v. 11, n. 2, p. 65-72, 2018.

FERREIRA, A. D. **Comparação entre método empírico e mecanístico-empírico para dimensionamento de pavimentos flexíveis.** In: 7º Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia, Evento Virtual, 2021.

FRANÇA, J. L. A. **Estudo comparativo entre o método vigente de dimensionamento de pavimentos e o novo método Medina.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Ceuma, São Luís, 2018.

FRANCISCO, A. **Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis.** Tese de Doutorado. Instituto Politecnico de Braganca (Portugal), 2012.

FRANCO, F. A. C. de P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV.** Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de estudos e pesquisas para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos.** Rio de Janeiro: Dnit, 2018.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos.** 286 f. Tese (Doutorado EM Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.286, 2016.

LAUBE, A. G.; BATISTA, M.; LEITE, P. C. **Estudo comparativo no dimensionamento do pavimento flexível através do método DNER e do método MEDINA.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário UNISOCIESC, Joinville, p.64, 2021.

LIMA, H. J. **A Ausência de fiscalização do excesso de peso e o desgaste precoce do pavimento flexível nas rodovias federais.** Tese de Pós-Graduação de Especialização em Operações Rodoviárias da Universidade Federal de Santa Catarina, Brasília, 2017.

LÍQUIDO, A. **Desgaste en la máquina de los Angeles, equivalentes de arena.** Bolivia, 2017.

LUVIZOTTO JUNIOR, E. **História do Transporte Rodoviário no Brasil.** São Paulo: Senac São Paulo, 2008.

- MARQUES, G. B. **Análise de pavimento flexível: Estudo de um trecho crítico na rodovia ERS-421.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Centro Universitário Univates, Lajeado, p.83, 2014.
- PIRES, G. M. *et al.* **Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos.** Tese de Doutorado da Universidade Federal de Santa Maria, 2014.
- PITANGUI, L. C. **Análise comparativa do método o DNER com o método mecanístico-empírico Medina.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília. Brasília, p.93, 2019.
- SANTOS, A. B. V. **Contribuições para um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada.** 2020.
- SANTOS, A. G. **Estudo teórico do efeito da interação entre camadas no comportamento estrutural de pavimentos asfálticos.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2018.
- SANTOS, T. F. **Comparações dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis: DNER (1981) e MEDINA.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p.146, 2022.
- SANTANA, H. **Manual de Pré-misturados a frio.** 1993.
- SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Projetos Rodoviários.** São Paulo: PINI, 2008.
- SEVILHA, D. R. **Determinação de traço de concreto asfáltico usinado a quente com dosagem marshall para camada de rolamento de pequena espessura destinada a vias de tráfego leve de veículos.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2019.
- SILVA A. B. **Desenvolvimento das estradas no Brasil. Revista Brasileira de Infraestrutura**, 5(2), 78-89. Recuperado de <http://www.exemplo.com/artigo456>, 2010.
- SILVA, D. C; BARBOSA, D. S. **Análise comparativa entre o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos – Medina e o Método do DNER.** Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará. Belém, p.74. 2021.
- SILVA, H. M. R. D. **Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique – Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas.** Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho; 2006.

SILVA, J. A. **Desenvolvimentos recentes na pavimentação de estradas no Brasil.** *Revista de Engenharia de Transportes*, 15(2), 45-62, 2020.

SILVA, J. E., et al. **Método nacional de dimensionamento de pavimentos-medina, avaliação da duplicação da AL-145.** 2018.

SILVA, L. M.; SANTOS, R. O. G. **Estudo comparativo: método empírico do DNIT e mecanístico-empírico (Medina) no dimensionamento de pavimentos flexíveis.** *Engineering Sciences*, v.9, n.1, p.114-124, 2021.

SILVA, N. E. G. **Análise comparativa do dimensionamento de pavimentos asfálticos pelo método do DNER e o método mecanístico-empírico Medina em um trecho da Br-101/AL.** Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, p.93. 2021.

SILVA, Y. D.; GODOI, L. C.; HOLZ, R. F. **Análise comparativa de custos entre métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos: AASHTO, DNIT e MEDINA.** *In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANOPET, Balneário Camboriú, 2019.*

SOARES, J. B.; MOTTA, L. M. G. **Considerações sobre a Determinação do Fator de Veículo no Cálculo do Número N.** Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2001.

SOUZA, R. S. Notas de Aula da Disciplina Teraplanagem e Pavimentação. **Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis.** PUG Goiás, 2023.

SMITH, J. **Desenvolvimento das vias brasileiras no século XX: O papel de John Casement na introdução do asfalto.** *Revista de Engenharia de Transportes*, 10(3), 45-58, 2005.

VITORAZZI, C. F. F.; PACHECCO, R. F. R. **Análise técnico e econômica entre pavimentos flexíveis e rígidos e sua aplicação na infraestrutura urbana em baias de ônibus.** Tese de Pós-Graduação de Engenharia de Infraestrutura, IFES, 2023.

VENDRUSCULO, J. I.; *et Al.* **Comparação entre pavimentos dimensionados com os métodos do DNER (1981) e MEDINA (2018): Estudo de caso com solos de subleito da cidade de Santa Maria/RS.** *In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado, 2018.*