

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JUAN ELISANDER MYSZKA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO
DNER E MEDINA EM PAVIMENTOS PROJETADOS NO ESTADO DO PARANÁ**

GUARAPUAVA

2023

JUAN ELISANDER MYSZKA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO
DNER E MEDINA EM PAVIMENTOS PROJETADOS NO ESTADO DO PARANÁ**

**COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THE DNER AND MEDINA SIZING
METHODS IN DESIGNED FLOORS IN THE STATE OF PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil,
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Paulo Henrique Carvalho Mello

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.

JUAN ELISANDER MYSZKA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO
DNER E MEDINA EM PAVIMENTOS PROJETADOS NO ESTADO DO PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil, Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Paulo Henrique Carvalho Mello

Data de aprovação: 12/dezembro/2023

Paulo Henrique Carvalho Mello
Especialista em Estruturas de concreto armado
<http://lattes.cnpq.br/3255681163912110>
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Petrônio Rodrigo Mello Montezuma
Doutor em Engenharia Civil
<http://lattes.cnpq.br/4013284756255170>
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

André Rodrigues
Mestre em Geotecnia
<http://lattes.cnpq.br/7283440277143374>
Controladoria-Geral da União - CGU

GUARAPUAVA

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pela minha saúde.

Agradeço a meu pai pela paciência e apoio.

A minha mãe e irmã por todo suporte e torcida.

A Isadora Colaço pelo carinho e incentivo.

Agradeço a todos os amigos e colegas que fizeram parte da minha formação acadêmica, em especial Gabriel Bueno e Vanessa Pontarollo.

Aos meus amigos de vida e inspirações Natã e Cassiano.

Agradeço a todos os demais familiares e amigos que torceram, oraram e me proporcionaram momentos felizes até esse momento.

Agradeço ao meu orientador Paulo pelas correções e por me ajudar a concluir esse trabalho.

Agradeço aos membros da banca Dr. Petrônio e Ms. André Rodrigues por compartilharem conhecimento e contribuírem com a avaliação desse trabalho.

RESUMO

Myszka, Juan Elisander. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento DNER e Medina em pavimentos projetados no estado do Paraná**. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2023.

A malha rodoviária é parte fundamental da infraestrutura do Brasil, tendo importante papel econômico e logístico. No entanto é relatado que as condições das vias não são ideais para as atividades as quais comportam, já que muito antes do final de vida útil do projeto apresentam muitas patologias que prejudicam a segurança e qualidade do pavimento. Um fator que pode estar relacionado a isso é a forma como as estruturas são dimensionadas. O trabalho traz uma análise comparativa entre os métodos do DNER (empírico) e do método de dimensionamento Medina (mecanicista-empírico), utilizando duas estruturas dimensionadas no estado do Paraná. Foram utilizados os dados de memoriais de projeto encontrados em mídias digitais, como dados de tráfego, solo e dimensionamento proposto. Realizou-se com o auxílio do software Medina a projeção de área trincada e o afundamento de trilha de roda no pavimento durante a sua vida útil, tanto com as estruturas dimensionadas pelo método do DNER quanto com as dimensionadas pelo método Medina. Constatou que houve diferença de espessuras do pavimento utilizando os diferentes métodos, sendo que em projetos que previam um volume de tráfego maior, a utilização apenas do método DNER considerou-se insuficiente. A utilização de dimensionamento empírico não é o único fator determinante em pavimentos inadequados, no entanto fica evidente que um dimensionamento em torno de experimentos, simulações e com viés mecanicista apresenta maior confiabilidade. Verificou-se ainda as principais tensões atuantes em pavimentos dimensionados por métodos distintos e como pequenas mudanças de espessuras de camadas afetam a resistência do pavimento. Verificou-se, assim como outros estudos realizados, que o método Medina apresenta uma importante solução para o dimensionamento de pavimentos, e que através da realização de segmentos de experimentação ao longo do tempo será possível aperfeiçoar o método buscando-se uma aproximação fidedigna da estimativa do software com a realidade.

Palavras-chave: pavimentos flexíveis; dimensionamento de pavimentos; Medina; Método DNER.

ABSTRACT

Myszka, Juan Elisander. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento DNER e Medina em pavimentos projetados no estado do Paraná**. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2023.

The highway network is a fundamental part of Brazil's infrastructure, playing an important economic and logistical role. However, it is reported that the conditions of the roads are not ideal for their functionality, since long before the end of the project's useful life they present many pathologies that harm the safety and quality of the pavement. One factor that may be related to this is the way the structures are dimensioned. The work provides a comparative analysis between the DNER methods (empirical) and the Medina design method (mechanistic-empirical), using two structures designed in the state of Paraná. Data from project memorials found in digital media were used, such as traffic, soil, and proposed sizing data. With the help of the Medina software, the projection of the cracked area and the sinking of the wheel track into the pavement during its useful life was carried out, both with the structures dimensioned using the DNER method and those dimensioned using the Medina method. It was found that there was a difference in pavement thickness using the different methods, and in projects that anticipated a greater volume of traffic, the use of only the DNER method was considered insufficient. The use of empirical design is not the only determining factor in inadequate pavements, however, it is clear that design based on experiments, simulations, and with a mechanistic bias presents greater reliability. The main stresses acting on pavements designed using different methods are also verified and how small changes in layer thickness affect the pavement's resistance. It was verified, as well as other studies carried out, that the Medina method presents an important solution for the sizing of pavements, and that by carrying out experimental segments over time it will be possible to improve the method by seeking a reliable approximation of the estimate of software with reality.

Keywords: flexible pavements; pavement sizing; MeDiNa; Method DNER.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição típica dos Pavimentos Flexíveis	18
Figura 2 - Plano de Tensões do Pavimento Flexível	19
Figura 3 - Distribuição de Tensões em Pavimentos Flexíveis.....	20
Figura 4 - Pavimento com trincas por fadiga	21
Figura 5 – Deformação Permanente, afundamento de trilha de roda	22
Figura 6 - Esquema representativo dos pontos críticos dos pavimentos.....	22
Figura 7 - Esquema de representação das siglas por camada	28
Figura 8 – Ábaco de dimensionamento de espessuras Método DNER	30
Figura 9 - Interface software Medina	32
Figura 10 - Exemplo do quadro de propriedades	33
Figura 11 - Ensaio de Flow Number.....	35
Figura 12 - Pontos de análise de deformação	36
Figura 13 - Esboço dos pontos de fadiga	38
Figura 14 - Função de transferência proposta por Fritzen (2006).....	40
Figura 15 - Modelo do Eixo Padrão.....	41
Figura 16 - Esquema de dimensionamento Mecanicista Empírico	42
Figura 17 - Esquematização do trabalho.....	44
Figura 18 – Mapa de Situação	45
Figura 19 - Detalhe do trecho	46
Figura 20 – Seção Transversal do Projeto A.....	46
Figura 21 – Localização da Rodovia – Projeto B	47
Figura 22 - Divisão de trechos novo Contorno	48
Figura 23 - Resumo estatístico do subleito	54
Figura 24 - Sistema de coordenadas AEMC.....	64
Figura 25 - Estrutura DNER trecho 1 lançada no software	66
Figura 26 - Resumo da análise trecho 1 - DNER.....	66
Figura 27 - Estrutura DNER trecho 2 lançada no software	67
Figura 28 - Resumo da análise trecho 2 - DNER.....	67
Figura 29 - Estrutura DNER trecho 3 lançada no software	68
Figura 30- Estrutura DNER Projeto B lançada no software	70
Figura 31 - Resumo de avaliação Projeto B – DNER – N2023	71
Figura 32 - Resumo de avaliação Projeto B – DNER – N2030	71
Gráfico 1 - Tempo x Área Trincada - Projeto A.....	81
Gráfico 2 - Tempo x Área Trincada - Projeto B - Rev. CAP 50/70	81
Gráfico 3 - Tempo x Área Trincada - Projeto B - Rev. CAP 60/85.....	82
Gráfico 4 - Deformação nas fibras inferiores das camadas	83
Gráfico 5 - Deformação no topo das camadas.....	84
Gráfico 6 - Tensões principais estrutura dimensionada pelo DNER.....	84
Gráfico 7 - Tensões principais estrutura dimensionada pelo Medina.....	81
Gráfico 8 - Espessura x N equivalente.....	81
Figura 33 - Ciclo de Fadiga x Espessura de Revestimento – Norma Europeia	86
Figura 34 - Ciclo de Fadiga x Espessura de Revestimento – Norma Americana	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - CBR _{IG} a partir do Índice de Grupo (IG).....	24
Tabela 2 - Condições e Restrições por camada para o dimensionamento	25
Tabela 3 - Fatores de equivalência de carga da AASHTO	26
Tabela 4 - Fatores de equivalência de carga da USACE.....	26
Tabela 5 - Coeficientes de equivalência estrutural	27
Tabela 6 - Espessuras mínimas de revestimento.....	29
Tabela 7 – Flow Number de acordo com classes e condições de operação	35
Tabela 8 - Grau de confiabilidade e critério de parada por tipo de via	41
Tabela 9 - Quadro com atualização de tráfego do EVTEA	48
Tabela 10 - Projeção de tráfego para o Horizonte de projeto 2023 - 2032.....	49
Tabela 11 - Projeção de tráfego para o Horizonte de projeto 2033 - 2042.....	50
Tabela 12 – Resumo do volume de veículos por trecho	51
Tabela 13 – Número N acumulado por trecho	51
Tabela 14 - N adotado por trecho.....	52
Tabela 15 - VMDAT e número N – Projeto B.....	52
Tabela 16 - Números N Projeto B.....	53
Tabela 17 - Parâmetros utilizados para dimensionamento do trecho 1	55
Tabela 18 Deflexão admissível (Dp), Espessura mínima do revestimento (Hcb), constantes relacionadas ao subleito (I1 e I2) no trecho 1	55
Tabela 19 - Estrutura DNER trecho 1	56
Tabela 20 - Parâmetros utilizados para dimensionamento do trecho 2	56
Tabela 21 – Deflexão admissível (Dp), Espessura mínima do revestimento (Hcb), constantes relacionadas ao subleito (I1 e I2) no trecho 2.	57
Tabela 22 - Estrutura DNER trecho 2.....	58
Tabela 23 - Parâmetros utilizados para dimensionamento do trecho 3	58
Tabela 24 - Deflexão admissível (Dp), Espessura mínima do revestimento (Hcb), constantes relacionadas ao subleito (I1 e I2) no trecho 3.	58
Tabela 25 - Estrutura DNER trecho 3.....	59
Tabela 26 - Estrutura pavimento DNER - Projeto B.....	60
Tabela 27 - Propriedades dos revestimentos	62
Tabela 28 - Propriedades Brita Graduada C4.....	62
Tabela 29 - Propriedades Brita Graduada C3.....	63
Tabela 30 - Propriedades solo adotado - Projeto A.....	63
Tabela 31 - Dados de Tráfego Trecho 1.....	65
Tabela 32 - Estrutura trecho 1 método DNER.....	65
Tabela 33 - Dados de tráfego trecho 2.....	66
Tabela 34 - Estrutura trecho 2 método DNER.....	67
Tabela 35 - Dados de tráfego trecho 3.....	68
Tabela 36 - Dados de tráfego Projeto B.....	70
Tabela 37 - Estrutura pavimento Projeto B DNER	70
Tabela 38 - Alteração de uma camada trecho 1 - Medina	73
Tabela 39 - Dimensionamento manual Medina - Trecho 1.....	73
Tabela 40 - Alteração de uma camada trecho 2 - Medina	74
Tabela 41 - Dimensionamento manual Medina - Trecho 2.....	74
Tabela 42 - Alteração de uma camada trecho 3 - Medina	75
Tabela 43 - Dimensionamento manual Medina - Trecho 3.....	75

Tabela 44 - Resumo comparativo projeto A.....	76
Tabela 45 - Comparativo dimensionamentos - Projeto B – N2021.....	77
Tabela 46 - Comparativo dimensionamentos - Projeto B – N2030.....	77
Tabela 47 - Resultados com CAP 60/85 – Projeto B – N2021	78
Tabela 48 - Resultados com CAP 60/85 – Projeto B – N2021	79
Tabela 49 – Modelo de simulação N equivalente.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	<i>American Association of State Highway</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ATR	Afundamento de trilha de roda
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional de Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EVTEA	Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental
ISC	Índice de suporte Califórnia
MEDINA	Método de Dimensionamento Nacional
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS DO TRABALHO	16
2.1	Objetivo Principal	16
2.2	Objetivos Secundários	16
3	DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PAVIMENTOS	17
3.1	Estrutura característica de pavimentos flexíveis	17
3.2	Comportamento estrutural	19
3.3	Patologias Comuns em Pavimentos Flexíveis no Brasil	20
3.4	Método de dimensionamento do DNER	22
3.4.1	Resistência dos materiais.....	23
3.4.2	Tráfego de Veículos	25
3.4.3	Dimensionamento das camadas do pavimento	27
3.5	Método de dimensionamento nacional de pavimentos - MEDINA	30
3.5.1	Premissas da Metodologia Mecanicista Empírica	31
3.5.2	Interface do software Medina	32
3.5.3	Hipóteses adotadas pelo software Medina	33
3.5.4	Modelos de Ruptura	34
3.5.5	Critério de deformação permanente	34
3.5.6	Critério de fadiga	37
3.5.7	Calibração e Validação – Função de Transferência	38
3.5.8	Carregamento, Tipos de vias e Critério de Parada	40
3.5.9	Metodologia Mecanicista Empírica de Forma Geral	42
4	METODOLOGIA	44
4.1	Caracterização dos projetos selecionados	45
4.1.1	Projeto A – Contorno Sul Metropolitano, BR 376.	45
4.1.2	Projeto B – Acesso principal Coronel Domingos Soares.....	46
4.2	Estudo de tráfego e definição do número N	47
4.2.1	Estudo de tráfego e definição do número N – Projeto A.....	47
4.2.2	Estudo de tráfego e definição do número N – Projeto B.....	52
4.3	Estudo Geotécnico – Subleito	53
4.3.1	Estudo subleito do Projeto A	53
4.3.2	Estudo subleito do Projeto B	54

4.4	Dimensionamento pelo método DNER	54
4.4.1	Concepção do Pavimento Projeto A.....	54
4.4.2	Dimensionamento do Pavimento Projeto A.....	55
4.4.3	Concepção do Pavimento Projeto B.....	59
4.5	Hipótese e Abordagem do trabalho	60
4.6	Materiais adotados para a simulação pelo método Medina	61
4.6.1	Materiais adotados para simulação – Projeto A e Projeto B.....	61
4.7	Análise de tensões AEMC	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5.1	Avaliação do software Medina dos projetos dimensionados pelo método DNER – Projeto A	65
5.1.1	Avaliação Trecho 1.....	65
5.1.2	Avaliação Trecho 2.....	66
5.1.3	Trecho 3	68
5.1.4	Análise dos resultados obtidos do Projeto A dimensionado pelo DNER	68
5.1.5	Avaliação do software Medina dos projetos dimensionados pelo método DNER – Projeto B.....	69
5.2	Dimensionamento satisfatório pelo Medina	72
5.2.1	Projeto A - Trecho 1	72
5.2.2	Projeto A - Trecho 2	74
5.2.3	Projeto A - Trecho 3	75
5.2.4	Resumo de resultados Projeto A.....	76
5.2.5	Projeto B.....	76
5.3	Área trincada ao longo do tempo.....	79
5.4	Análise de tensões e deformações utilizando o AEMC	81
5.5	Análise de N equivalente em função da espessura de revestimento.....	84
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

Os estudos na área de transportes e pavimentação tem grande importância para a sociedade, visto que buscam meios para solucionar problemas existentes, de modo que haja garantia de que os investimentos realizados pelo Estado, promovam infraestrutura de qualidade para a população (Confederação Nacional do Transporte, 2017).

O modal rodoviário no Brasil é responsável por movimentar, aproximadamente, 65% das mercadorias e 95% dos passageiros, indicando a relação direta entre o desenvolvimento econômico e a infraestrutura rodoviária no país. No ano de 2022 a Confederação Nacional do Transporte – CNT realizou uma pesquisa em todo o Brasil onde foram avaliados 110.333 quilômetros de rodovias pavimentadas, nos quais mais da metade apresentaram algum tipo de defeito em sua estrutura, sendo essas classificadas como regular, ruim ou péssima (Confederação Nacional do Transporte, 2023).

Nas rodovias brasileiras, os administradores públicos têm encontrado dificuldades em gerenciar a infraestrutura devido à falta de um planejamento adequado. Em relação ao sistema viário, mesmo havendo elevados investimentos, grande parte das redes de pavimentos encontram-se em um estado ruim. Isso se deve à falta de uma política regida por critérios rigorosos afim de oferecer pavimentos adequados aos usuários (LIMA, RAMOS E FERNANDES, 2006).

Por conseguinte, a inadequada estrutura apresentada nas Rodovias, contribui para aumentar os riscos de acidentes e implicam em altos investimentos para a manutenção, restauração e até mesmo a reconstrução das vias (Confederação Nacional do Transporte, 2023).

A pesquisa revela ainda que o custo operacional aumenta, em média, 33,1% no Brasil devido a pavimentos deficientes por parte das empresas de transporte e levam ao desperdício de aproximadamente 1 bilhão de litros de diesel, gerando emissão de dióxido de carbono na atmosfera e impactando negativamente o meio ambiente (Confederação Nacional do Transporte, 2023).

Percebe-se que os governantes priorizam a quantidade de rodovias pavimentadas em relação a qualidade das estruturas para o uso da população, sendo por diversas vezes constatado pavimentos subdimensionados, que acarretam a

deterioração precoce e por consequência a diminuição da vida útil deles. Com isso a administração pública acaba tendo maiores gastos com manutenção e revitalização, gerando um desperdício de recursos financeiros (SHOUJI,2000).

Para Bernucci *et al.* (2008), um pavimento deve ser uma estrutura que garanta aos usuários, economia, conforto e segurança. Nesse sentido, o dimensionamento é um dos fatores mais importantes à qualidade e vida útil dos pavimentos durante sua construção. No Brasil, a maioria dos pavimentos foram dimensionados por métodos empíricos, especialmente, utilizando a metodologia do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Entretanto, esse tipo de metodologia apresenta uma forma generalista, com um caráter simplificado, levando a uma análise superficial das variáveis que influenciam o desempenho funcional e estrutural de um pavimento (COUTINHO 2011; FRITZEN *et al.*, 2019).

Nos últimos anos buscou-se estudar outras formas para realizar o dimensionamento dos pavimentos rígidos e flexíveis, caracterizando os materiais de maneira distinta em relação aos métodos tradicionais, de acordo com o volume, a velocidade do tráfego, o peso, a pressão das rodas do carregamento, o efeito do clima e, principalmente, com as propriedades mecânicas dos materiais que serão utilizados. Obteve-se, assim, uma metodologia mecanicista-empírica com capacidade para uma melhor determinação e análise dos pavimentos (COUTINHO 2011; FRITZEN *et al.*, 2019).

A metodologia mecanicista-empírica desenvolvida para as rodovias brasileiras, é denominada de Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (Medina), sendo implementada nos últimos anos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) como substituto para os métodos empíricos tradicionais. O Medina tem o auxílio de um *software* próprio e gratuito, que acarreta uma maior acurácia em razão da utilização de uma nova tecnologia (DALLA ROZA, 2018).

O método substitui o antigo ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) por ensaios de Módulo de Resiliência e de Deformação Permanente, sendo possível utilizar dados reais derivados de ensaios e informações atualizadas para cada região do país. Dessa forma, o método promete proporcionar dimensionamentos que resultem em estruturas mais econômicas e duradouras (DALLA ROZA, 2018).

Torna-se importante o conhecimento entres os métodos de dimensionamento, visto que pode gerar resultados econômicos favoráveis, já que quando adotado um

método que caminhe em direção contrária aos métodos empíricos é possível obter uma melhor estimativa de como a estrutura do pavimento tende a se comportar ao longo dos anos, melhorando assim a sua execução e durabilidade (FERNANDES, 2016).

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, ainda passa por uma fase de implantação e aperfeiçoamento, torna-se importante dessa maneira, através de trabalhos científicos, apresentar dados que ilustrem os efeitos práticos dessa forma de dimensionamento, uma vez que, a malha viária é imensa, necessitando de manutenção periódica, e que muitas rodovias ainda serão projetadas.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 Objetivo Principal

O presente trabalho tem por objetivo analisar comparativamente os aspectos quantitativos e qualitativos dos dimensionamentos pelo método do DNER e Medina.

2.2 Objetivos Secundários

- Comparar a diferença de espessura das camadas, entre o método empírico e mecanicista-empírico.
- Analisar as tensões e deformações geradas nas camadas ao longo do tempo para o pavimento projetado pelo método DNER e método Medina.
- Analisar o impacto do aumento de espessura no revestimento nas tensões e deformações.

3 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PAVIMENTOS

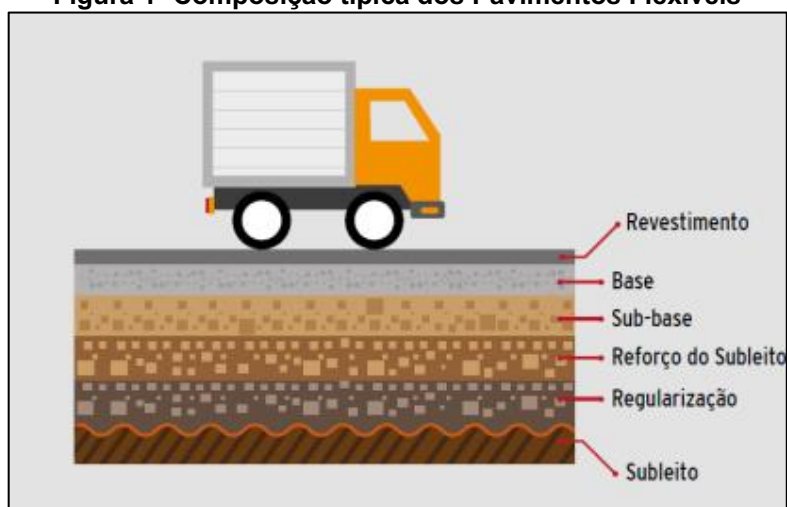
O pavimento é uma estrutura constituída por múltiplas camadas de diferentes materiais, que possuem espessuras finitas, e que se alocam compactadas imediatamente acima do terreno natural. A estrutura de um pavimento tem por função resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos, de forma duradoura e econômica, assegurando aos usuários conforto e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os pavimentos são classificados em flexíveis, semirrígidos e rígidos. Os flexíveis se caracterizam por apresentarem quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, sendo que o carregamento aplicado na estrutura é distribuído em todas elas de forma equivalente às suas espessuras e aos materiais que a compõe. Os rígidos são associados a presença do cimento Portland em sua composição, apresentando revestimentos com maior rigidez em relação as demais camadas da estrutura, absorvendo dessa forma a maior parte das tensões solicitadas. Os pavimentos semirrígidos caracterizam-se por apresentarem uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias (DNIT, 2006; BERNUCCI *et al.*, 2008).

3.1 Estrutura característica de pavimentos flexíveis

Segundo Balbo (2007), o trabalho estrutural de um pavimento flexível se dá pelo comportamento mecânico que cada camada apresenta de forma individual e pelo conjunto de todas elas. Cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos condições adequadas de suporte e rolamento em qualquer condição climática. Na figura 1 é apresentado uma composição típica de um pavimento flexível em que se distinguem 6 camadas.

Figura 1 -Composição típica dos Pavimentos Flexíveis



Fonte: CNT (2017)

- Revestimento: camada que recebe diretamente as cargas dos veículos, havendo a necessidade de ser composta por materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar a movimentação horizontal, para que o pavimento não sofra grandes deformações, desagregação dos componentes ou perda de compactação.
- Base: tem a função de dissipar os esforços para as camadas inferiores, portanto deve ser composta por materiais de boa qualidade, principalmente nos quesitos de resistência e rigidez.
- Sub-base: é uma opção construtiva e econômica, quando não é viável que a camada de base seja construída imediatamente acima do reforço ou regularização do subleito. Sua função estrutural é de complementar a base, atuando também com a dissipação dos esforços estáticos e dinâmicos, provenientes do tráfego de veículos e do clima. A sub-base pode atuar também na drenagem de infiltrações e no controle da ascensão capilar da água.
- Reforço do subleito: se observado que o subleito apresenta baixíssima resistência, deve-se optar por executar um reforço, a fim de que a fundação subjacente a ele receba pressões de menor magnitude, e consiga assim resistir.
- Subleito: o terreno natural em que está sendo executado o pavimento, sendo a fundação da estrutura. Nessa camada ocorre a absorção definitiva

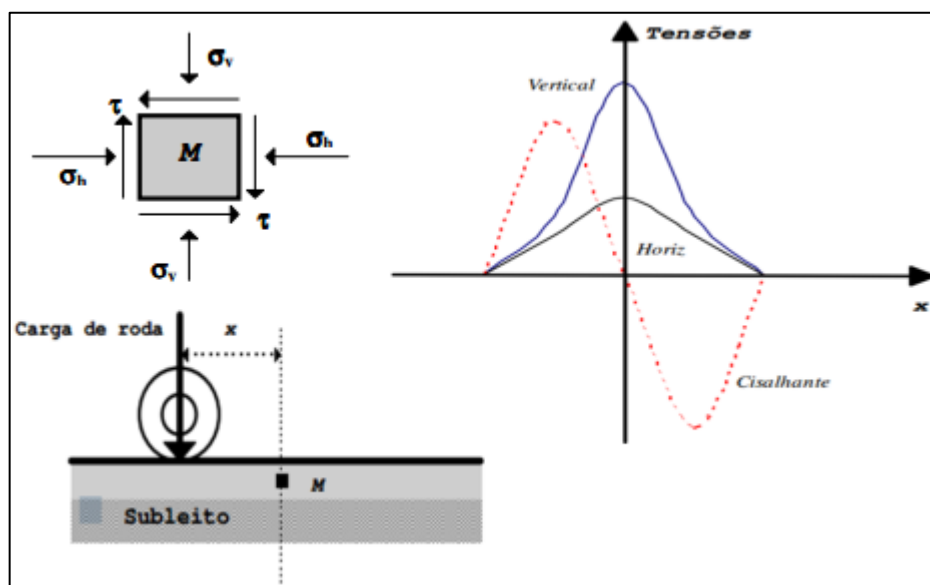
dos esforços verticais. No topo do subleito é realizada uma regularização e compactação, para que ocorra uma configuração transversal e longitudinal.

3.2 Comportamento estrutural

O tráfego de veículos gera nos pavimentos, pulsos de tensões e de deformações, normais e cisalhantes. Os esforços são oriundos de ações verticais, que dependem do tipo de pneu, pressão de enchimento e da carga que a roda submete ao pavimento (MEDINA; MOTTA, 2005).

Os pulsos de tensões e de deformações são duplos e com reversão de sentido. Os planos principais sofrem rotação, coincidindo com os planos horizontal e vertical para os pontos situados no plano longitudinal da carga de roda e ao longo da vertical que passa pelo centro da carga, como é mostrado na figura 2 (GONÇALVES,1999).

Figura 2 - Plano de Tensões do Pavimento Flexível



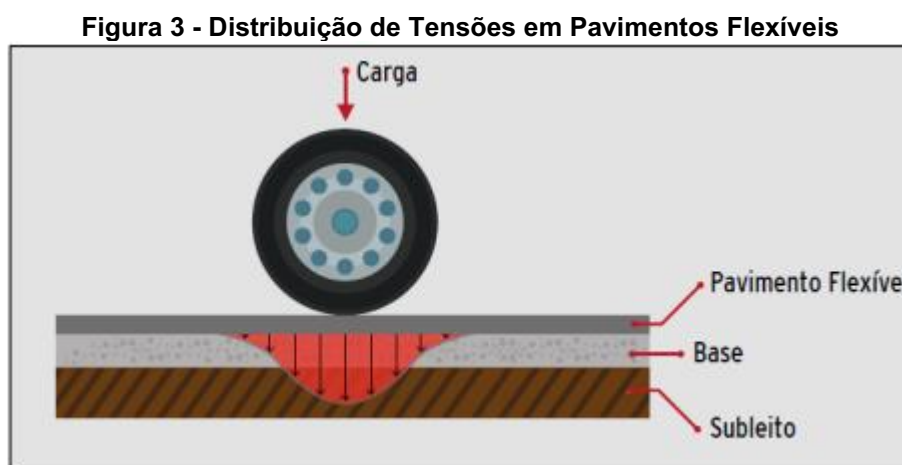
Fonte: Gonçalves (1999)

Na estrutura de um pavimento, o comportamento é transiente, os materiais granulares e os solos apresentam comportamento tensão-deformação não linear, e os materiais asfálticos têm seu comportamento sensíveis à velocidade de aplicação das cargas e à temperatura (MEDINA; MOTTA, 2005).

A repetição de esforços sobre o pavimento pode provocar a ruptura, devido ao fato de uma pequena parcela dos materiais que constituem a estrutura não serem

perfeitamente elásticos, não retornando assim ao seu estado inicial (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2006).

A estrutura de um pavimento asfáltico deve ser projetada para receber e transmitir esforços a fim de aliviar pressões sobre as camadas inferiores, as quais geralmente são menos resistentes. Um pavimento possui comportamento mecânico adequado quando os materiais que o compõe desenvolvem deformações compatíveis com a sua natureza e estados de tensões compatíveis com o dimensionamento (BALBO,2007). A figura 3 apresenta a distribuição de tensões em pavimentos flexíveis.



Fonte: CNT (2016)

3.3 Patologias Comuns em Pavimentos Flexíveis no Brasil

Os defeitos que surgem nos pavimentos e que podem levar a diminuição da vida útil deles se deve a diversos fatores, como erros de projeto, seleção inadequada de materiais, erro de dosagem, técnicas construtivas inadequadas, entre outras. No Brasil, existem duas patologias mais comuns observadas nas rodovias, o trincamento por fadiga e a deformação permanente (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O trincamento por fadiga, é uma degradação estrutural progressiva provocada por solicitações repetidas, devido a repetição das operações dos veículos, causando microfissuras acumulativas no revestimento (MEDINA; MOTTA, 2015).

Os trincamentos se iniciam onde as tensões são maiores, porém como o carregamento ocorre de forma quase ininterrupta, as trincas se espalham por toda a espessura da camada. Com isso a camada que deveria ser impermeável, possibilita a entrada de água na estrutura, o que gera uma redução no desempenho geral do

pavimento. A figura 4 apresenta um exemplo de pavimento com trincas causadas por fadiga (BRANCO, PEREIRA, SANTOS, 2006).

Figura 4 - Pavimento com trincas por fadiga



Fonte: Cassin Antunes (2018)

A deformação permanente é caracterizada pelo afundamento longitudinal do pavimento asfáltico, sendo os principais motivadores a passagem repetida das cargas dos veículos e fatores ambientais. Deve-se isso as propriedades de alguns materiais, que apresentam deformação plástica em resposta aos esforços, sendo assim irreversíveis quanto ao seu estado original, causando por exemplo um dos defeitos mais comuns que é o afundamento de trilha de roda, figura 5 (GARDETE, 2006).

Essa patologia gera dificuldade na drenagem de água e aumenta o risco de aquaplanagem, conseqüentemente diminuindo a segurança e conforto da rodovia. A temperatura interfere devido ao comportamento termo sensível do ligante asfáltico, quando a temperatura aumenta ele torna-se mais fluído diminuindo a resistência a deformação (BERNUCCI *et al.*, 2008).

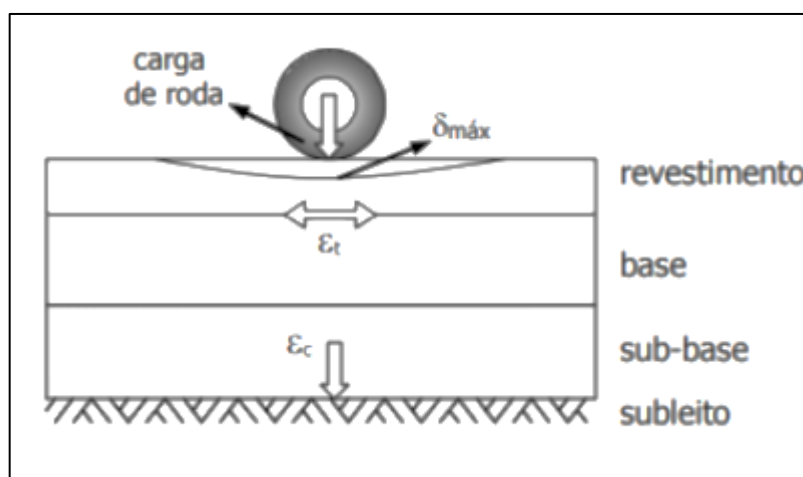
Figura 5 – Deformação Permanente, afundamento de trilha de roda



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Devido a essas principais patologias, há o entendimento que os pavimentos possuem dois critérios de ruptura, dano à fadiga que ocorre principalmente devido as deformações de tração na fibra inferior do revestimento e do afundamento de trilha de roda, que ocorre principalmente no subleito. Há, portanto, alguns pontos críticos a serem observados na estrutura. A figura 6 apresenta um esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos (SILVA, 2014).

Figura 6 - Esquema representativo dos pontos críticos dos pavimentos



Fonte: Franco (2007)

3.4 Método de dimensionamento do DNER

O método do DNER para o dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos, foi proposto na década de 1960 pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza, seu desenvolvimento foi baseado em um método americano, criado pelo Corpo de

Engenheiros do Exército Americano, e que utilizava o índice suporte Califórnia (CBR) (MEDINA; MOTTA, 2005).

O ensaio CBR foi criado para estudar os fatores que levavam as rodovias do estado da Califórnia à ruptura, dessa forma era possível testar os materiais utilizados no campo, em um laboratório sob condições extremas. Por se tratar dos primeiros estudos de pavimentos, os testes eram feitos com base totalmente empírica (COUTINHO, 2011).

O método do DNER tem como base, o ensaio CBR que também passou a ser realizados nos laboratórios do país para avaliar a capacidade de suporte relativa dos subleitos e a utilização dos coeficientes de equivalência estrutural estabelecidos pela pista da *American Association os State Highway Officials* (ASSHO), e que foram devidamente adaptadas (COUTINHO, 2011).

3.4.1 Resistência dos materiais

As capacidades resistivas dos subleitos e dos demais materiais são verificados exclusivamente pelo CBR, esse ensaio permite a obtenção do Índice Suporte Califórnia. Para a realização do ensaio são utilizados corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade especificada para o serviço, preconizado pela norma DNER-ME 049/94 (DNIT, 2006; COUTINHO, 2011).

Quando se deseja um resultado mais confiável e com maior segurança, utiliza-se para o dimensionamento o CBR corrigido, que é o CBR em função do Índice de Grupo (IG), que varia de IG = 0 para solos ótimos e IG = 20 para solos péssimos, como apresentado na tabela 1. Com isso é possível obter o Índice de Suporte (IS), como mostra a equação 1 (SOUZA, 1981):

$$IS = \frac{CBR + CBR_{IG}}{2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

CBR : valor obtido em ensaio do material

IS : Índice de Suporte

CBR_{IG} : CBR corrigido em função de IG.

O Índice de grupo é um valor empírico obtido pela equação 2 (DNIT, 2006):

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

a: porcentagem de material que passa na peneira nº 200, menos 35. Se a porcentagem obtida nessa subtração for maior que 75, adota-se 75; se for menor que 35, adota-se 35. ("a" varia de 0 a 40);

b: porcentagem de material que passa na peneira nº 200, menos 15. Se a porcentagem obtida nesta diferença for maior que 55, adota-se 55; se for menor que 15, adota-se 15. ("b" varia de 0 a 40);

c: valor do Limite de Liquidez menos 40. Se o limite de Liquidez for maior que 60, adota-se 60; se for menor que 40, adota-se 40. ("c" varia de 0 a 20);

d: valor de Índice de Plasticidade menos 10. Se o Índice de Plasticidade for maior que 30, adota-se 30; se for menor que 10, adota-se 10. ("d varia de 0 a 20).

Tabela 1 - CBR_{IG} a partir do Índice de Grupo (IG)

Índice de Grupo (I.G.)	C.B.R. _{IG}
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

Fonte: Adaptado de Souza (1981)

O método empírico do DNER, estabelece algumas condições que os materiais de cada camada devem apresentar, segundo a capacidade de suporte. Na tabela 2 apresentam-se algumas condições e restrições:

Tabela 2 - Condições e Restrições por camada para o dimensionamento

Camada	Condições e Restrições
Materiais do subleito	Apresentar expansão máxima, segundo ensaio CBR de 2%, e um CBR $\geq 2\%$
Materiais para reforço do subleito	Apresentar CBR maior que do subleito e expansão $\leq 1\%$
Materiais da sub-base	Apresentar CBR $\geq 20\%$, Índice de Grupo (IG) = 0 e expansão $\leq 1\%$
Materiais da base	Apresentar CBR $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$, Limite de Liquidez $\leq 25\%$ e Índice de Plasticidade $\leq 6\%$

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

3.4.2 Tráfego de Veículos

Em relação ao tráfego de veículos, utiliza-se para o dimensionamento o número (N), que é o número de operações dos eixos dos veículos esperados durante o período de projeto escolhido. Todas as operações de diferentes tipos de veículos e eixos, são transformados para uma operação equivalente de um eixo adotado como padrão, com carga de 8,2 toneladas.

Para os cálculos de dimensionamento, os fatores individuais de automóveis e caminhões leves são desprezíveis, sendo importante apenas a utilização dos fatores de caminhões médios, pesados, semirreboques e reboques (DNIT, 2016).

Para o cálculo de N, é necessário obter o volume total de tráfego na via de projeto.

O volume total de tráfego pode ser obtido pela equação 3:

$$V_t = \frac{365 \cdot V_1 \cdot \left[\left(1 + \frac{t}{100} \right)^P - 1 \right]}{\frac{t}{100}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

V_1 : volume médio diário de tráfego no ano de abertura, em um sentido;

P : período de anos;

t : taxa de crescimento anual em progressão geométrica.

Com o volume total conhecido, calcula-se N utilizando a equação 4:

$$N = V_i \cdot FE \cdot FC = V_i \cdot FV \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

V_i : volume total de tráfego;

FE : fator de eixos, número que multiplicado pelo número de veículos resulta no número de eixos correspondentes;

FC : fator de carga, número que multiplicado pelo número de eixos que operam resulta no número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

FV : fator de veículo, número que multiplicado pelo número de veículos que operam, resulta diretamente no número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

O fator de eixos (FE) pode ser obtido pela equação 5:

$$FE = \frac{n}{V_i} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

n: número total de eixos;

V_i : volume total de veículos.

O fator de carga (FC) pode ser calculado por diferentes metodologias, as mais usuais são dos trechos experimentais da AASHTO e do USACE. As tabelas 3 e 4 apresentam as equações utilizadas por cada metodologia em função de do peso bruto total sobre o eixo (P).

Tabela 3 - Fatores de equivalência de carga da AASHTO

Tipos de eixo	Equações (P em tf)
Simplex de rodagem simples	$FC = (P/7,77)^{4,32}$
Simplex de rodagem dupla	$FC = (P/8,17)^{4,32}$
Tandem duplo (rodagem dupla)	$FC = (P/15,08)^{4,14}$
Tandem triplo (rodagem dupla)	$FC = (P/22,95)^{4,22}$

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Tabela 4 - Fatores de equivalência de carga da USACE

Tipos de eixo	Faixas de Cargas (t)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 - 8	$FC = 2,0782 \cdot 10^{-4} \cdot P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \cdot 10^{-6} \cdot P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 - 11	$FC = 1,5920 \cdot 10^{-4} \cdot P^{3,4720}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \cdot 10^{-6} \cdot P^{5,4840}$
Tandem triplo	0 - 18	$FC = 8,0359 \cdot 10^{-5} \cdot P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \cdot 10^{-7} \cdot P^{5,5789}$

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Para o cálculo do fator de veículo (FV), é necessário previamente realizar a contagem de veículos e a identificação do número de eixos deles. utiliza-se a equação 6:

$$FV = \frac{\sum (P_i) \cdot (FV_i)}{100} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

P_i : porcentagem que cada categoria de veículo ocorre na estrada;

FV_i : fator de veículos individual para cada categoria de veículo.

3.4.3 Dimensionamento das camadas do pavimento

O dimensionamento de pavimentos pelo método do DNER, é encontrado no “Manual de Pavimentação” do DNIT. Estabelece-se o dimensionamento em três etapas: cálculo da espessura total do pavimento, em função dos valores de N e CBR; escolha do revestimento; cálculo de espessuras das demais camadas que compõe a estrutura (DNIT,2006).

Para a definição da espessura adota-se o coeficiente de equivalência estrutural para o material que será utilizado, devido a diferença de comportamento mecânico entre o material base granular e o material que irá constituir a camada do pavimento de fato. Os coeficientes para diferentes materiais são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Coeficientes de equivalência estrutural

(continua)

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

Tabela 5 - Coeficientes de equivalência estrutural

(conclusão)

	Coeficiente K
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

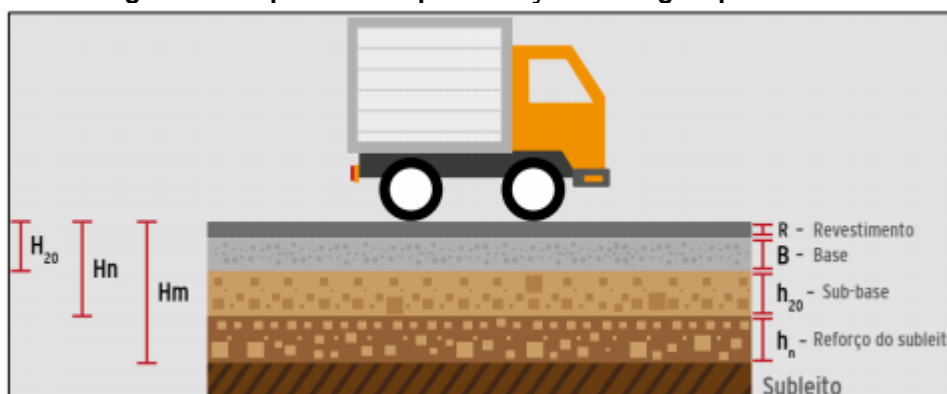
Fonte: Adaptado de DNIT (2016)

Os coeficientes estruturais são designados da seguinte forma, de acordo com as camadas que pertencem:

- Revestimento: K_r ;
-
- Base: K_b ;
- Sub-base: K_s ;
- Reforço: K_{ref} .

As espessuras das camadas do pavimento são expressas conforme as siglas representadas na figura 7:

Figura 7 - Esquema de representação das siglas por camada



Fonte: DNIT (2016)

Onde:

R: Espessura da camada de revestimento (cm);

B: Espessura da camada de base (cm);

h_{20} : Espessura da camada de sub-base (cm);

h_n : Espessura da camada do reforço do subleito (cm);

H_m : Espessura do pavimento sobre o subleito (cm);

H_n : Espessura do pavimento sobre o reforço do subleito (cm);

H_{20} : Espessura do pavimento sobre a sub-base (cm).

Adota-se no método do DNER, uma espessura mínima para os revestimentos, com o propósito de proteger a base dos esforços causados pelo tráfego. O valor é obtido em função do número N, sendo utilizado principalmente em pavimentos com bases de comportamento puramente granular, as espessuras equivalentes são apresentadas na tabela 6 (DNIT, 2006).

Tabela 6 - Espessuras mínimas de revestimento

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: Adaptado de DNIT (2016)

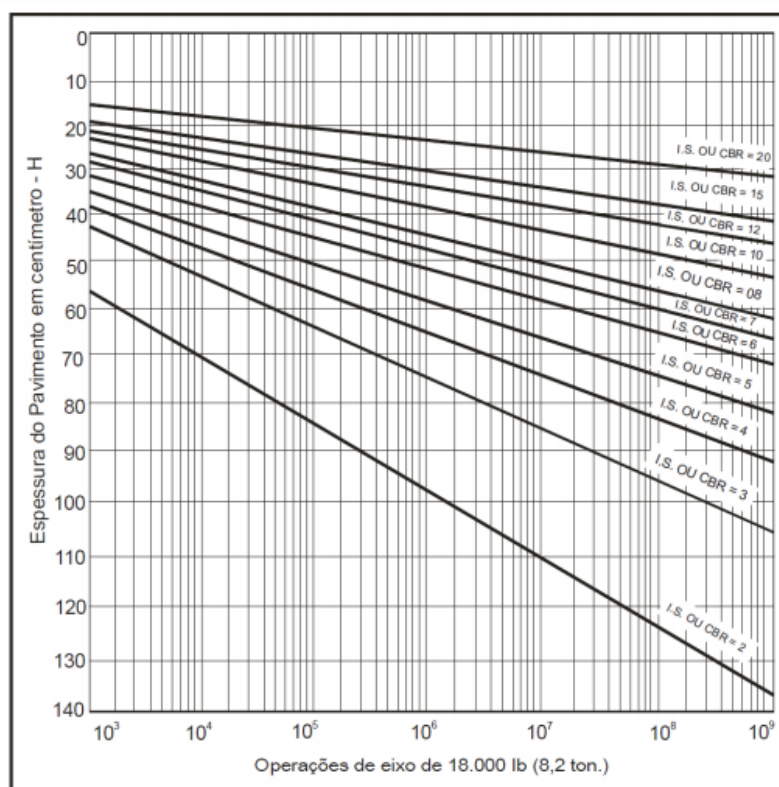
Sendo determinada a espessura do revestimento do pavimento, utiliza-se o ábaco mostrado na figura 8, para adotar as espessuras H_m , H_n e H_{20} . Por fim para obter as espessuras de base B, sub-base h_{20} e reforço do subleito h_n , utiliza-se as inequações 7,8 e 9 sucessivamente (DNIT, 2006).

$$R.K_r + B.K_b \geq H_{20} \quad \text{Equação 7}$$

$$R.K_r + B.K_b + h_{20}.K_s \geq H_n \quad \text{Equação 8}$$

$$R.K_r + B.K_b + h_{20}.K_s + h_n.K_{\text{Ref}} \geq H_m \quad \text{Equação 9}$$

Figura 8 – Ábaco de dimensionamento de espessuras Método DNER



Fonte: DNIT (2016)

Uma forma alternativa de se obter as espessuras é através da equação 10:

$$H_t = 77,67.N.CBR^{-0,598} \quad \text{Equação 10}$$

3.5 Método de dimensionamento nacional de pavimentos – MEDINA

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (Medina), é um método do tipo mecanicista empírico, resultado de uma pesquisa desenvolvida entre os anos de 2015 e 2018 pelo Instituto Nacional 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 apoio e colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e de diversas Universidades e pesquisadores do Brasil (DNIT,2020).

O Medina surge como uma proposta para dimensionar pavimentos, com intuito de se projetar melhor, de acordo com as solicitações que o tráfego propõe e garantindo maior confiabilidade na estimativa de vida útil das rodovias, uma vez que, muitas delas apresentam patologias nos primeiros anos após a execução (SILVA, 2018).

3.5.1 Premissas da Metodologia Mecanicista Empírica

O método empírico muitas vezes não consegue traduzir dados experimentais para um problema real de campo, no dimensionamento de pavimentos isso se reflete claramente quando surgem patologias precoces, isso se deve ao fato de que não são levados em consideração fatores fundamentais, como tensões, deformações e deslocamentos, como deveriam (FRANCO, 2000).

Segundo Motta 1991, um método de dimensionamento é definido como analítico ou mecanicista, quando se utiliza de teoria ou método de cálculo de esforços atuantes para prever tensões e deformações oriundos do tráfego e do clima que agem na estrutura do pavimento, e busca compatibilizá-las com as tensões resistentes.

A metodologia mecanicista empírica baseia-se em duas importantes teorias, a de Boussinesq (1885) e a de Burminster (1943), que permitem realizar uma aplicação da teoria da elasticidade na pavimentação. A teoria de Boussinesq considerava a ação de cargas verticais, concentradas ou uniformemente distribuídas, aplicadas em superfícies de meios homogêneos semi-infinitos, elásticos e isotrópicos (FRANCO, 2007).

A teoria da elasticidade de Burminster, foi realizada em meios estratificados que apresentavam duas ou três camadas elásticas. Ambas contribuíram de forma significativa para os primeiros estudos mecânicos nos pavimentos, entretanto a tecnologia da época não permitia realizar simulações em meios compostos por mais de três camadas, que se aproximaria assim de um modelo ideal de como é formado a estrutura de um pavimento (MEDINA; MOTTA, 2015).

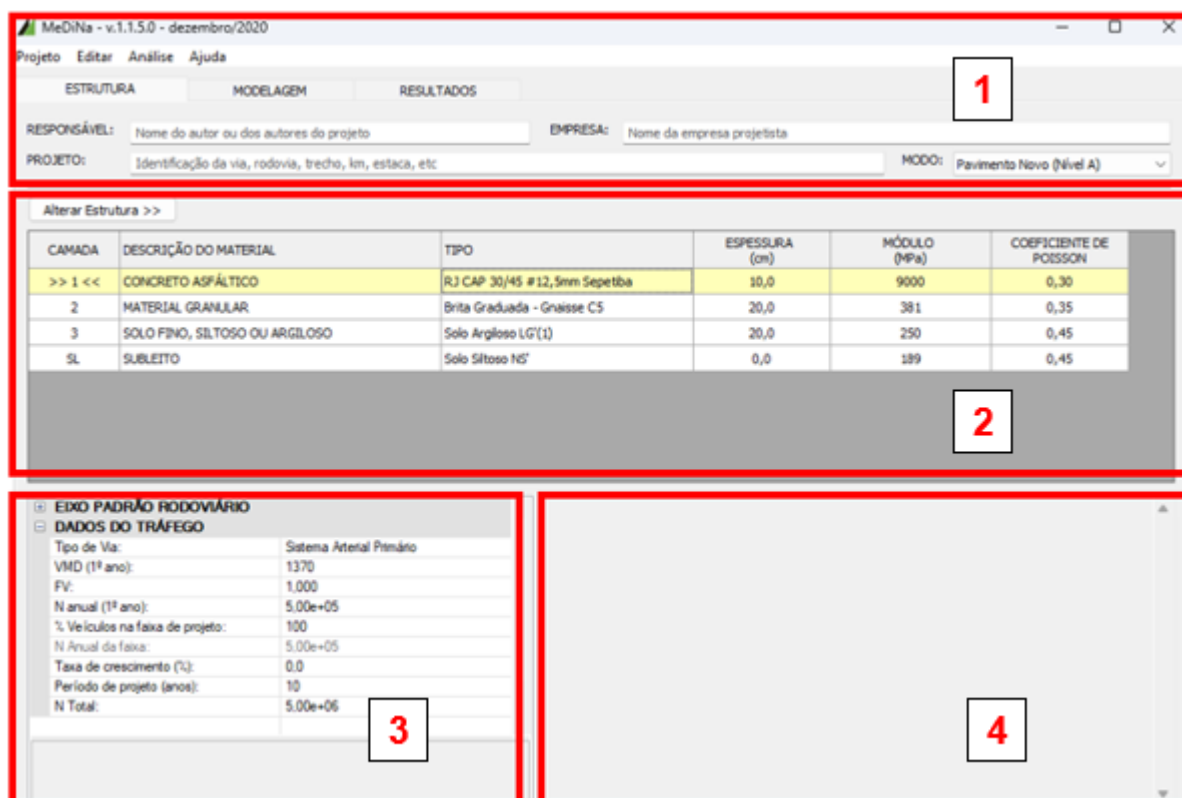
Mesmo no início da construção de pavimentos, os modelos matemáticos propostos pelas teorias conseguiram satisfazer de uma forma positiva a necessidade de resultados preliminares para o dimensionamento. Entretanto com a evolução da tecnologia, principalmente a partir da década de 1970, surgiram os primeiros programas computacionais de cálculo, sendo possível reduzir o tempo gasto nas

operações, além de utilizar variáveis como o coeficiente de Poisson e criar modelos que possuíssem mais de três camadas (MEDINA,1997).

3.5.2 Interface do software Medina

A tela inicial do software Medina apresenta-se da seguinte forma como mostrado na figura 9.

Figura 9 - Interface software Medina



Fonte: Software Medina (2021)

A área (1) é destinada para preenchimento de informações quanto a identificação do projeto; a (2) é utilizada como entrada de dados sobre os materiais dos projetos em cada camada; na (3) ocorre a entrada de dados quanto ao tráfego; a (4) é o local onde o programa apresenta o resumo dos resultados das análises ou dos dimensionamentos.

Como é possível analisar na área (2) apresentada na imagem, o programa apresenta uma estrutura padrão base, que pode ser totalmente alterada pelo projetista, sendo possível simular a estrutura com no mínimo três camadas e no

máximo oito camadas. Ao lado dos materiais é possível notar algumas propriedades desses, como espessura, módulo de resistência e coeficiente de Poisson. Além disso é possível acessar as propriedades detalhadas de cada material, apresentando-se um quadro como a figura 10 a seguir.

Figura 10 - Exemplo do quadro de propriedades

Propriedades da Camada 2	
BASE DE DADOS	
Projeto	
Brita Granito Gnaiss C1	
Brita Granito Gnaiss C2	
Brita Granito Gnaiss C3	
Brita Granito Gnaiss C4	
Brita Granito Gnaiss C5	
Brita Granito Gnaiss C6	
Brita Granito Gnaiss C7	
MATERIAL GRANULAR	
Parâmetros	
Espessura (cm)	20,0
Coeficiente de Poisson	0,35
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	381
Características	
Material selecionado	Brita Granito Gnaiss C5
Material	Brita Graduada
Abrasão Los Angeles (%)	43,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 141
Deformação Permanente	
Modelo:	$ep = \psi_1.(s_3^{\psi_2}).(sd^{\psi_3}).(N^{\psi_4})$
Coeficiente de Regressão (k1 ou p...	0,0868
Coeficiente de Regressão (k2 ou p...	-0,2801
Coeficiente de Regressão (k3 ou p...	0,8929
Coeficiente de Regressão (k4 ou p...	0,0961

Fonte: Software Medina (2021)

Após a definição da estrutura (materiais e espessuras), o software faz análises quanto a área trincada e a deformação permanente do projeto, também é possível solicitar um redimensionamento para que os critérios mínimos sejam atendidos.

3.5.3 Hipóteses adotadas pelo software Medina

Como apresentado pelo Manual de utilização do programa Medina, as hipóteses fundamentais da solução computacional são baseadas nas mesmas para solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, sendo elas as seguintes:

- 1) Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- 2) A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- 3) As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- 4) Todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;

- 5) A superfície da camada não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- 6) Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- 7) A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- 8) A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- 9) As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

3.5.4 Modelos de Ruptura

Segundo o DNIT (2006), para um dimensionamento ser denominado mecanicista empírico, o primeiro critério é um modelo estrutural, onde seja possível realizar análises quanto a mecânica do pavimento, quando esses são submetidos a tensões, deformações e descolamentos em decorrência do tráfego de veículo. Para esses modelos são adotados critérios de ruptura baseados no surgimento e propagação de defeitos na estrutura.

3.5.5 Critério de deformação permanente

Realizar a previsão de deformação limite no subleito é um processo complexo, pois exige tempo elevado e envolve muitas variáveis. Por ser complexo, a deformação permanente ainda é estudada de forma indireta, por meio de tensões verticais e deformações resilientes. Os ensaios mais utilizados são o de compressão uniaxial (DNIT 184/2018-ME), compressão triaxial (DNIT 178/2018-ME) e os ensaios de simuladores de tráfego (DNIT 134/2018-ME) (COUTINHO, 2011).

No método nacional de dimensionamento, o valor de *Flow Number*, apresenta-se como propriedade do material e deve assim ser exigido no controle de qualidade durante a execução da obra, de acordo com as condições que a via apresenta (DNIT, 2020).

O *Flow Number* (FN) é obtido por meio do “ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente” normatizado pelo DNIT (184/2018-ME). No procedimento um corpo de prova cilíndrico é submetido a um esforço de compressão vertical, como mostra a figura 11. O resultado é verificado por meio de gráficos de deformação permanente vertical uniaxial e taxa de deformação plástica vertical versus números de ciclos de aplicação da carga (DNIT, 2020).

Figura 11 - Ensaio de Flow Number



Fonte: DNIT (2018)

Os limites das classes de desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente estão apresentados na tabela 7:

Tabela 7 – Flow Number de acordo com classes e condições de operação

Classe	Flow Number (FN)	N recomendado Condições Normais	N recomendado Condições Severas
1	FN \geq 100 CICLOS	N < 1e6	Não recomendado
2	100 CICLOS \leq FN < 300 CICLOS	1e6 \leq N < 1e7	N < 1e6
3	300 CICLOS \leq FN < 750 CICLOS	1e7 \leq N < 1e8	1e6 \leq N < 1e7
4	750 CICLOS \leq FN < 2000 CICLOS	N \geq 1e8	1e7 \leq N < 1e8
5	FN \geq 2000 CICLOS	-	Nser \geq 1e8

Fonte: Adaptado de DNIT (2020)

As condições normais representadas na tabela dizem respeito a vias que tem velocidade superior a 60 km/h, vias sem intersecções, sem terceira faixa e temperatura asfáltica moderada. Já as condições severas são as vias que apresentam tráfego lento, intersecções, terceira faixa, praças de pedágio e temperatura máxima de revestimento elevada (DNIT, 2020).

É considerado ainda no novo método de dimensionamento a deformação causada no solo, considerando que a deformação permanente total do pavimento é totalizada pela soma das deformações de cada tipo de solo. Para a avaliação de deformação é utilizada a equação 11 proposta por Guimarães (2009), que surgiu

devido a um padrão de relação entre deformação permanente, estado de tensões e repetições de aplicação da tensão desviadora.

$$\varepsilon_p (\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$\varepsilon_p (\%)$: deformação permanente específica;

ψ_1, ψ_2, ψ_3 e ψ_4 : parâmetros de regressão do modelo obtidos por ensaio;

σ_3 : tensão confinante em kgf/cm²;

σ_d : tensão desvio em kgf/cm²;

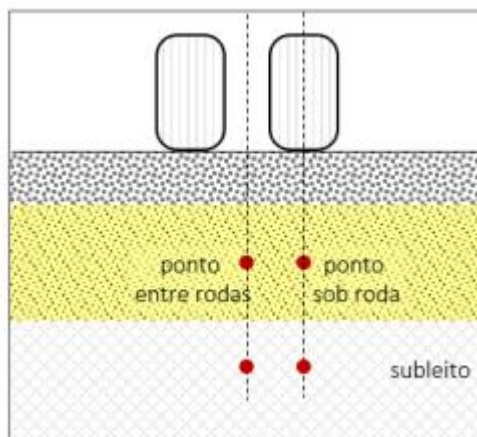
ρ_0 : tensão de referência, considerada com pressão atmosférica igual a 1 kgf/cm²;

N: número de ciclos de aplicação da carga.

A determinação de coeficientes é realizada através de ensaio triaxial de carga repetida, onde se varia os valores de tensão confinante e desviadora, e registra-se as deformações plásticas que o corpo de prova assumiu.

No software Medina, a tensão é calculada tanto no ponto sob a roda, quanto no ponto entre as rodas, no centro das camadas, como mostra a figura 12:

Figura 12 - Pontos de análise de deformação



Fonte: Franco e Motta (2020)

Através dos ensaios e equações apresentadas referentes ao estudo da deformação, é possível obter a deformação esperada total do pavimento, para isso pode-se utilizar a equação 12:

$$\delta_{Ptotal} = \sum_i^n (\varepsilon_{p(i)} \cdot h_i) \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

δ_{Ptotal} : deformação permanente total;

$\varepsilon_{p(i)}$: deformação específica da camada (i);

h_i : espessura da camada (i).

3.5.6 Critério de fadiga

Os limites de fadiga apresentados por pavimentos são descritos por uma curva obtida através de ensaios de carregamento repetido. Para realizar o ensaio é mantido uma tensão controlada sobre um corpo de prova, em ciclos repetidos, buscando simular a situação real de campo, em que a carga aplicada seria a operação dos veículos sobre a estrutura (FRITZEN, 2016).

O Método Nacional de Dimensionamento adota a equação 13 para obter a curva de fadiga.

$$N_f = K_1 \cdot \varepsilon_i^{k_2} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

N_f : Número de aplicações de carga;

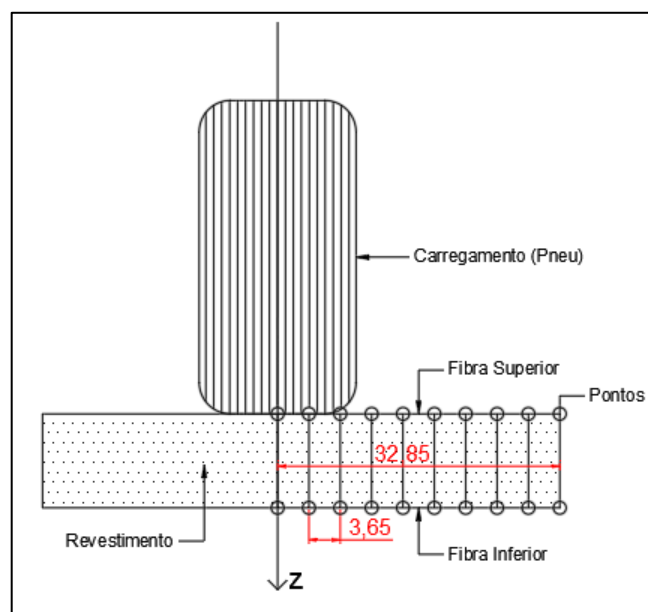
ε_i : Deformação específica resiliente;

K_1 e K_2 : Coeficientes obtidos previamente por ensaios que dependem dos materiais utilizados.

Dentro do software Medina, a fadiga é calculada através das tensões aplicadas em dez pontos da superfície, espaçados de 3,65 cm, e mais dez pontos de fibra inferior da última camada asfáltica, totalizando vinte pontos, podendo calcular o dano de até duas camadas asfálticas. É calculada então uma média entre os vinte

pontos, em uma grade de dez pontos que são distribuídos na direção horizontal a partir do centro do carregamento (eixo padrão), como mostrado na figura 13, esse valor é utilizado para calcular a área trincada com base na função de transferência (DNIT, 2020).

Figura 13 - Esboço dos pontos de fadiga



Fonte: Autor (2023)

3.5.7 Calibração e Validação – Função de Transferência

Segundo Franco (2007), para que todos os critérios de ruptura dos pavimentos possam ser úteis em um método de dimensionamento, esses devem considerar fatores relacionados aos parâmetros do método de ensaio escolhido, dessa forma há a necessidade de uma calibração para os seguintes aspectos:

- Condições específicas observadas em campo, tais como condição climática, intensidade das cargas e do tráfego;
- Modelo de resposta do pavimento considerado, se ele apresenta comportamento mecânico elástico linear, elástico não linear ou outro;
- Forma de trabalho com os dados disponíveis em relação ao número de repetições de carga ou o próprio carregamento.

Portanto as simulações de situações reais em laboratórios devem seguir critérios condizentes, de acordo com as tecnologias e ferramentas que se tem disponível para a realização dos cálculos, bem como as qualidades dos materiais disponíveis e os fatores ambientais que interferem nas condições da estrutura.

Especialmente para o critério de fadiga, Fritzen (2016), propôs um modelo matemático que correlaciona, os danos por fadiga e área trincada. O estudo partiu de seis tipos de misturas asfálticas e quarenta e cinco pistas experimentais com diferentes condições de tráfego. Foi observado um padrão, para representá-lo foi proposto uma curva Sigmoidal com base na equação 14:

$$AT(\%) = \frac{e^{-A} \cdot e^{-B}}{1 - e^{-B}} \quad \text{em que: } A = \left(\frac{N'-1}{Z-1} \right)^n \quad \text{e } B = \left(\frac{-1}{Z-1} \right)^n \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

Z e n: parâmetros da curva sigmoide;
 AT (%): área trincada estimada em percentual;
 N': número equivalente deslocado.

A variável N' é uma calibração do número de passagens do eixo padrão rodoviário, em função do deslocamento, para que se possa minimizar os erros com relação a evolução da área trincada. Para o cálculo de N' utiliza-se a equação 15:

$$N' = (N \cdot fS) \cdot 10^{-10} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

N: número de repetições do eixo padrão no momento da medição da área trincada;
 fS: Fator de deslocamento atribuído de forma aleatória para minimizar o erro entre a curva e a evolução da área trincada;
 N': Número N ajustado.

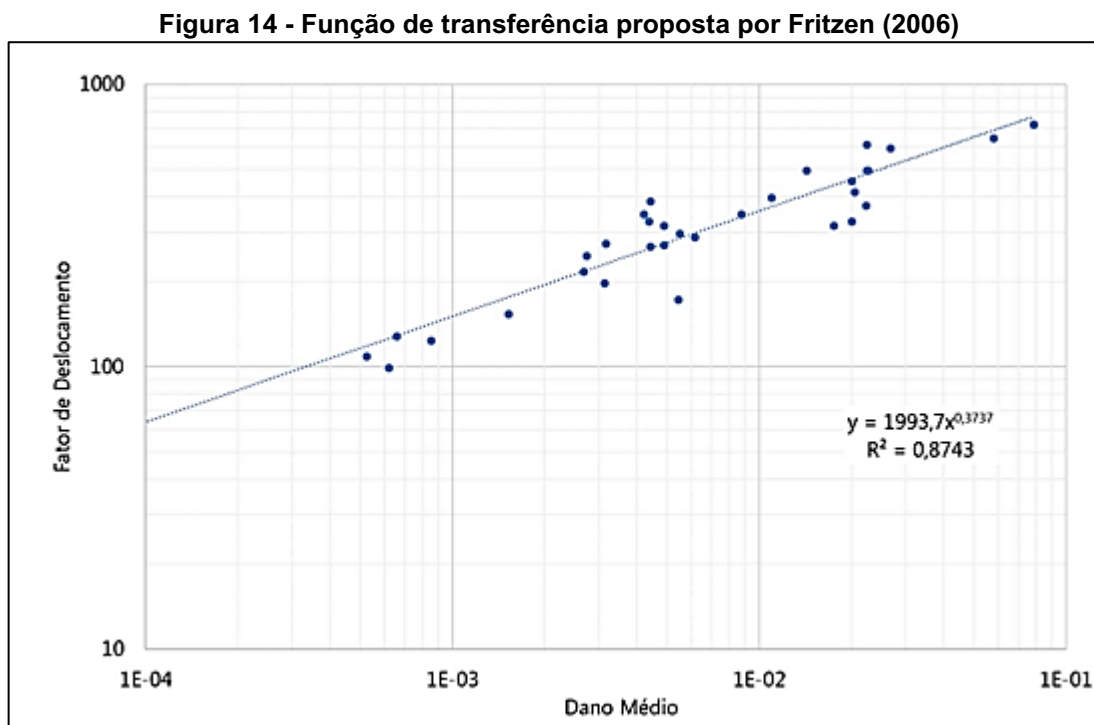
Com a curva já corrigida, e com a média dos vinte pontos ($D_{\text{médio}}$) derivada do ensaio de fadiga, é possível fazer uma previsão da área trincada no pavimento, através da Função de Transferência, que é apresentada na equação 16:

$$fS = C1 \cdot (D_{\text{médio}})^{C2} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

fS: fator de deslocamento;
 $D_{\text{médio}}$: dano médio de vinte pontos causados por fadiga;
 C1 e C2: constantes definidas no processo de calibração.

Na figura 14, temos um exemplo da função de transferência, apresentada através de uma curva que correlaciona o fator de deslocamento e dano médio.



Fonte: Franco e Motta (2020)

Todos os dados apresentados fazem parte do critério de ruptura adotado pelo Método Medina, com a calibração e ajustes realizados nos ensaios em razão das condições de campo é possível definir a vida útil da estrutura.

3.5.8 Carregamento, Tipos de vias e Critério de Parada

O carregamento no Método Mecanicista Empírico segue um padrão próximo ao do modelo do DNER, o número N é calculado da mesma forma, adota-se ainda um eixo com as seguintes características mostradas pela figura 15.

Figura 15 - Modelo do Eixo Padrão



Fonte: Franco e Motta (2020)

Dentro do Método Nacional de Dimensionamento, é aplicado o critério de parada do dimensionamento, bem como o grau de confiabilidade das análises realizadas pelo software, para cada tipo de via (DNIT,2020). A tabela 8 apresenta esses dados:

Tabela 8 - Grau de confiabilidade e critério de parada por tipo de via

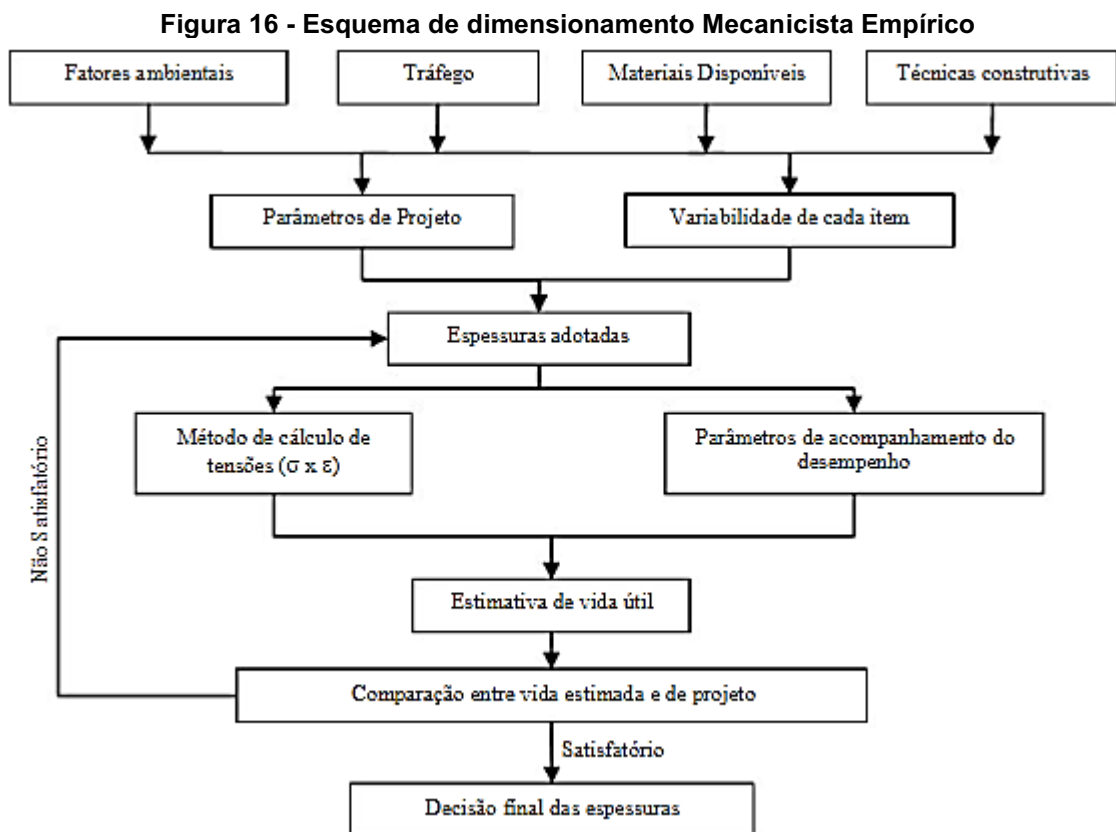
TIPO DE VIA	CONFIABILIDADE	ÁREA TRINCADA	DEF. PERMANENTE
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10 mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Local	65%	30%	20 mm

Fonte: Adaptado de DNIT (2020)

O grau de confiabilidade pode ser descrito como a medida da probabilidade de um pavimento se manter adequado para o serviço indicado no projeto. Em caso de um pavimento projetado pelo método Medina apresentar danos maiores que o previsto, antes do tempo previsto, isto indica que o projeto não atendeu as expectativas do programa computacional e teria que ter sido dimensionado com camadas mais espessas, diferentes materiais ou outras soluções compatíveis com o problema.

3.5.9 Metodologia Mecanicista Empírica de Forma Geral

De modo geral no comparativo entre o método totalmente empírico do DNER, com o Método Nacional de Dimensionamento que está sendo implantado, a maior distinção é a preocupação com a resistividade mecânica do pavimento, já que no segundo há a presença de ensaios e simulações, que tentam aproximar o que ocorre no campo para dentro do laboratório. No esquema proposto por Motta (1991), figura 16, é possível identificar como estrutura-se o dimensionamento por uma metodologia Mecanicista Empírica.



Fonte: Motta (1991)

Franco (2007), resume o procedimento para dimensionamento mecanicista empírico da seguinte forma:

- Coletar dados dos materiais de pavimentação, do tráfego e das condições ambientais do local de projeto;
- Correlacionar o comportamento dos materiais em função do tipo de carregamento, e das resistências dos materiais e tráfego em função das épocas sazonais;

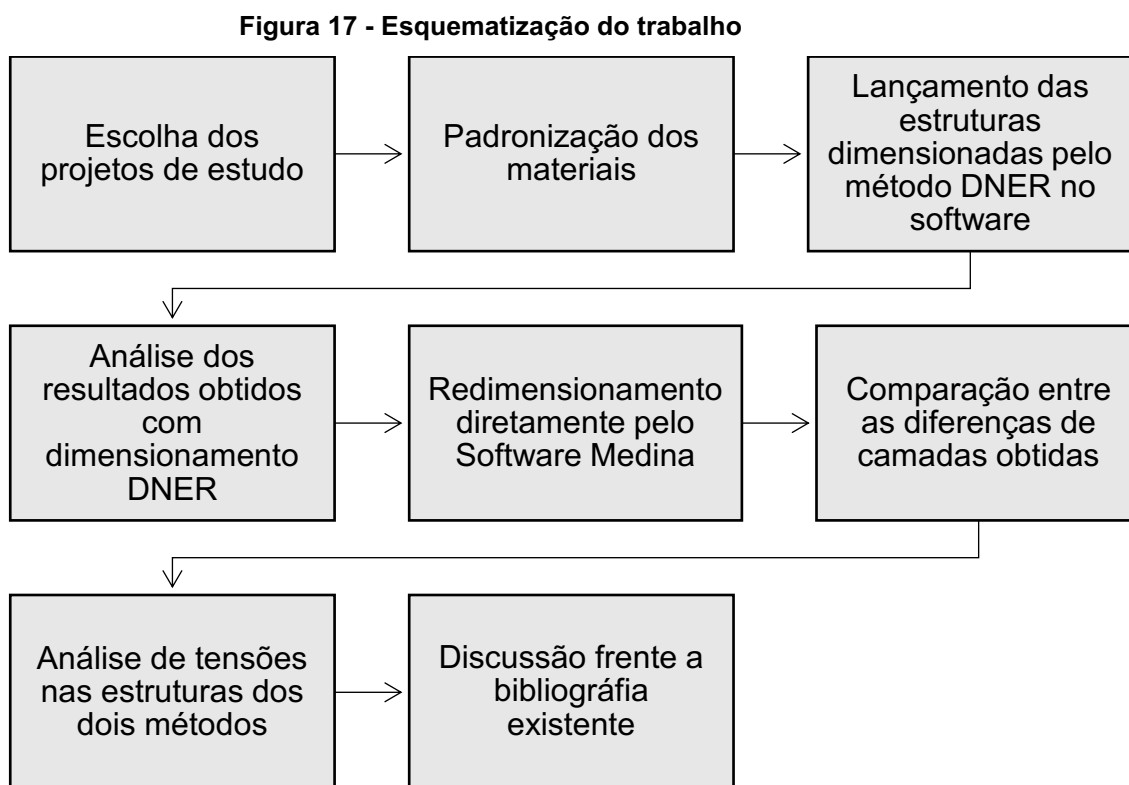
- Adotar espessuras das camadas e calcular as tensões e deformações de acordo com as correlações obtidas anteriormente;
- Relacionar os valores críticos de tensões e deformações com os danos que podem ser encontrados nos pavimentos devido a repetição de cargas por meio de modelos de previsão;
- Verificar se as espessuras determinadas inicialmente satisfazem as condições impostas no dimensionamento.

4 METODOLOGIA

Para analisar a comparação de um possível problema que seria o dimensionamento de pavimentos flexíveis, foram selecionados dois projetos que seguiram alguns requisitos de seleção, sendo eles:

- projetos referentes a rodovias localizadas no estado do Paraná;
- acervo digital disponível com memorial de dimensionamento;
- dados quanto ao tráfego e vida útil do projeto;
- dimensionamento pelo método DNER (mesmo que apresentasse posterior análise pela metodologia mecanicista).

A esquematização do trabalho é apresentada na figura 17.



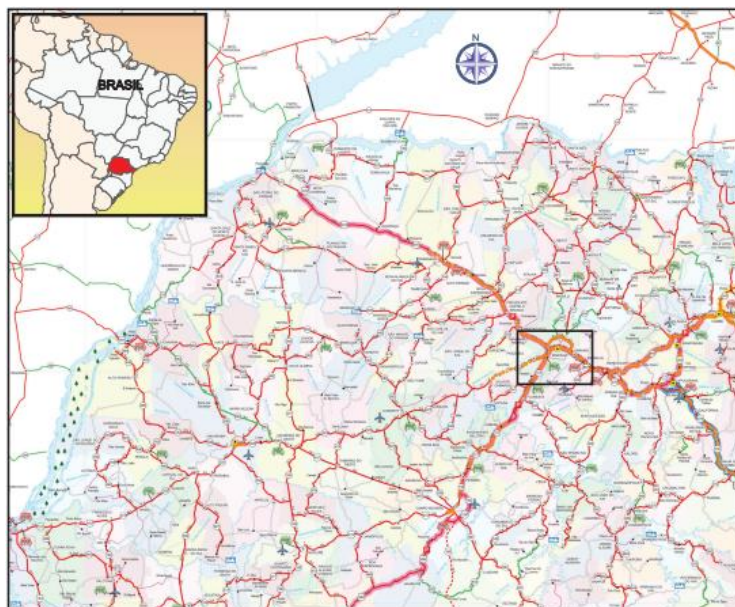
Fonte: Autor (2023)

4.1 Caracterização dos projetos selecionados

4.1.1 Projeto A – Contorno Sul Metropolitano, BR 376.

O primeiro projeto, PROJETO A, refere-se à implantação e pavimentação do Contorno Sul Metropolitano de Maringá-PR, na BR-376. O trecho ocorre entre a PR-182 (divisa SP/PR) – BR-101 (divisa PR/SC). A extensão total de pavimentação é de 13,18 km. A rodovia é classificada como de sistema arterial primária. A figura 18 apresenta o mapa de situação e a figura 19 o detalhe da localização do trecho.

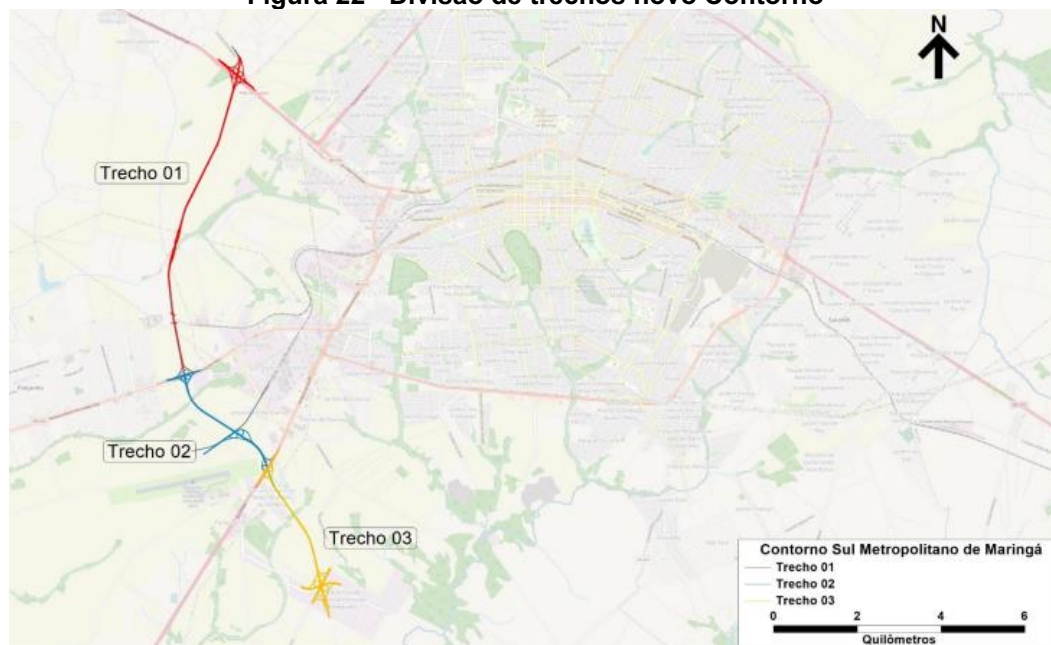
Figura 18 – Mapa de Situação



Fonte: Anteprojeto DNIT (2021)

Para o tráfego do contorno que se realizou a análise, o trecho 03, corresponde ao km 9,70 ao 13,10. Na figura 22 é apresentado a divisão dos trechos do contorno para o estudo de tráfego.

Figura 22 - Divisão de trechos novo Contorno



Fonte: Consórcio STE/SIMEMP (2021)

Realizou-se uma atualização para o horizonte de projeto, inicialmente adotou-se uma taxa de crescimento de 3% a.a., conforme preconizado pelo Manual de Tráfego de do DNIT, utilizando os dados obtidos e atualizando para o ano de 2021. Na tabela 9 é apresentado a atualização dos volumes de tráfego.

Tabela 9 - Atualização de tráfego do EVTEA

Implementação do CSMM			Atualização do Tráfego – Taxa de crescimento de 3% a.a.	
Trecho	VDMA 2010	VDMA 2013 (proj)	VDMA 2014	VDMA 2021 (janeiro)
Trecho 1 (km 0,00 a km 6,80)	7.275	8.183	8.429	10.089
Trecho 2 (km 6,80 a km 9,70)	16.483	18.541	19.097	22.859
Trecho 3 (km 9,70 a km 32,50)	19.280	21.687	22.338	26.738

Fonte: Adaptado de Consórcio STE/SIMEMP (2021)

A estimativa do projeto é que a obra comece a ser utilizada no ano de 2023, portanto foi aplicada novamente uma taxa de crescimento de 3% a.a. para obtenção dos Volumes Diários Médios anuais por categoria veicular em um horizonte de projeto de 20 anos, ou seja, até o ano de 2042. Nas tabelas 10 e 11 é apresentado a projeção do tráfego para o horizonte de projeto.

Tabela 10 - Projeção de tráfego para o Horizonte de projeto 2023 - 2032

Trecho	Classe Veicular	VDMa 2021	2023	2032
Trecho 01 (km 0,00 a km 6,80)	Motos	1195	1268	1655
	Automóveis	4567	4845	6322
	Utilitários	870	923	1204
	Ônibus	176	187	244
	Caminhão 2C	1103	1170	1526
	Caminhão 3C	1136	1205	1572
	Caminhões Articulados	1043	1106	1444
	Total	10089	10704	13966
Trecho 02 (km 6,80 a km 9,70)	Motos	2753	2921	3811
	Automóveis	10510	11150	14548
	Utilitários	2001	2123	2770
	Ônibus	312	331	432
	Caminhão 2C	2448	2597	3388
	Caminhão 3C	2520	2673	3488
	Caminhões Articulados	2316	2457	3206
	Total	22859	24251	31 643
Trecho 03 (km 9,70 a km 32,50)	Motos	3374	3580	4671
	Automóveis	12885	13670	17836
	Utilitários	2455	2604	3398
	Ônibus	447	474	618
	Caminhão 2C	2546	2701	3525
	Caminhão 3C	2621	2781	3628
	Caminhões Articulados	2410	2557	3336
	Total	26738	28367	37012

Fonte: Adaptado de Consórcio STE/SIMEMP (2021)

Tabela 11 - Projeção de tráfego para o Horizonte de projeto 2033 - 2042

Trecho	Classe Veicular	VDMa 2021	2032	2042
Trecho 01 (km 0,00 a km 6,80)	Motos	1195	1655	2224
	Automóveis	4567	6322	8496
	Utilitários	870	1204	1618
	Ônibus	176	244	328
	Caminhão 2C	1103	1526	2051
	Caminhão 3C	1136	1572	2113
	Caminhões Articulados	1043	1444	1940
	Total	10089	13966	18769
Trecho 02 (km 6,80 a km 9,70)	Motos	2753	3811	5121
	Automóveis	10510	14548	19551
	Utilitários	2001	2770	3723
	Ônibus	312	432	580
	Caminhão 2C	2448	3388	4554
	Caminhão 3C	2520	3488	4688
	Caminhões Articulados	2316	3206	4308
	Total	22859	31 643	42525
Trecho 03 (km 9,70 a km 32,50)	Motos	3374	4671	6277
	Automóveis	12885	17836	23970
	Utilitários	2455	3398	4566
	Ônibus	447	618	831
	Caminhão 2C	2546	3525	4737
	Caminhão 3C	2621	3628	4876
	Caminhões Articulados	2410	3336	4484
	Total	26738	37012	49741

Fonte: Adaptado de Consórcio STE/SIMEMP (2021)

Analisando os dados de volume de tráfego levantados, pode-se resumir os dados por trecho como apresentado na tabela 12.

Tabela 12 – Resumo do volume de veículos por trecho

Trecho	Volume total - Horizonte do projeto (2042)
Trecho 01 (km 0,0 a km 6,8)	18.769
Trecho 02 (km 6,8 a km 9,7)	42.525
Trecho 03 (km 9,7 a km 32,5)	49.741

Fonte: Autor (2023)

Para a análise do impacto do tráfego estimado no pavimento da rodovia, procedeu-se ao cálculo do número de eixos equivalentes de 8,2 toneladas para o método da AASHTO.

Nos cálculos, foram considerados somente os ônibus e veículos de carga. Para os últimos, o carregamento por eixo considerado foi o máximo permitido por legislação, acrescido de 5% de tolerância, conforme Resolução CONTRAN nº 526. Além disso, do fluxo total, adotou-se a proporção de 70%/30% entre veículos circulando com cargas e os vazios, uma proporção que se aproxima do resultado da pesquisa de origem e destino que foi realizada.

Na tabela 13 a seguir são apresentados os quadros com o resumo dos números N, obtidos acumulados pelo método AASHTO, para o trecho 1, 2 e 3 respectivamente, que serão utilizados posteriormente para o dimensionamento pelo método Medina.

Tabela 13 – Número N acumulado por trecho

Trecho	Ano	VMD-O	FV-O	VMD-C	FV-C	Fator de carga	Número N	Número N Acum.
Trecho 1	2023	187	2,0220	3481	2,6124	0,5000	1,73E+06	1,73E+06
	2032	244	2,0220	4542	2,6124	0,5000	2,26E+06	1,98E+07
	2042	328	2,0220	6104	2,6124	0,5000	3,03E+06	4,64E+07
Trecho 2	2023	331	2,0220	7727	2,6124	0,5000	3,81E+06	3,81E+06
	2032	432	2,0220	10082	2,6124	0,5000	4,97E+06	4,36E+07
	2042	580	2,0220	13550	2,6124	0,5000	6,67E+06	1,02E+08
Trecho 3	2023	474	2,0220	8039	2,6124	0,5000	4,01E+06	4,01E+06
	2032	618	2,0220	10489	2,6124	0,5000	5,23E+06	4,59E+07
	2042	831	2,0220	14097	2,6124	0,5000	7,03E+06	1,08E+08

Fonte: Adaptado de Consórcio STE/SIMEMP (2021)

A tabela 14 a seguir traz de forma resumida os números N adotados por trecho no projeto.

Tabela 14 - N adotado por trecho

Trecho	Número N – Ano 1	Número N – Ano 20
1	1,73 E+06	4,64 E+07
2	3,81 E+06	1,02 E+08
3	4,01 E+06	1,08 E+08

Fonte: Autor. (2023)

4.2.2 Estudo de tráfego e definição do número N – Projeto B

Para o projeto B não há o estudo detalhado dos volumes de tráfego para a rodovia em questão, no entanto sabe-se que foram utilizados dois postos de contagem ao longo do trecho e ainda um externo em outra rodovia pois acredita-se que com a nova pavimentação muitos veículos utilizariam essa estrada para acessar a PR-449 que possibilita o acesso ao município de Palmas. Na tabela 15 é mostrado a projeção de VDMAT e do número N.

Tabela 15 - VMDAT e número N – Projeto B

Projeto	Ano	Volumes de tráfego - VMDAT			Valores número N	
		Veículos Tipo		Total	USACE	
		Passeio	Comercial		Ano a Ano	Acumulado
1º ano	2014	736	231	968	3,15E+05	3,15E+04
10º ano	2023	961	302	1263	4,12E+05	3,62E+06

Parâmetros adotados no cálculo do número N

Fatores de Veículo	Fator Climático	Fator de pista	
7,47	1,0	0,5	
Taxa de Crescimento do tráfego (%)		Ano inicial	Período Projeto
3,00		2014	10 anos

Fonte: Adaptado de DER/PR (2017)

Nota-se que a vida útil projetada para esse pavimento foi de 10 anos. Para o dimensionamento dos pavimentos foi utilizado o valor N encontrado de acordo com a norma da USACE, dessa forma adotou-se esse valor para realização das análises posteriores pelo Medina. Verificou-se ainda que as obras dessa rodovia foram entregues no ano de 2021, então para atender a vida útil foi realizado também a

estimativa do número N para o ano de 2030, seguindo a taxa de crescimento de 3% ao ano para o tráfego. Os números N utilizados seguem em resumo na tabela 16.

Tabela 16 - Números N Projeto B

Ano	N de projeto (USACE)
2023	3,62E+06
2030	3,22E+07

Fonte: Autor (2023)

4.3 Estudo Geotécnico – Subleito

4.3.1 Estudo subleito do Projeto A

O estudo do subleito foi realizado no ano de 2013, sendo realizado prospecção a trado, pá e picareta, inspeção visual para identificação de segmentos de possíveis locais de solos compressíveis, verificação e medição quanto a ocorrência de nível d'água, coleta de materiais e encaminhamento para laboratório e realização dos principais ensaios:

- Granulometria - DNER – ME 080/94: Solos – Análise granulométrica por peneiramento;
- Limite de Liquidez – DNER – ME 122/94: Solos – Determinação do limite de liquidez – Método de referência e método expedito;
- Limite de Plasticidade - DNER – ME 082/94: Solos – Determinação do limite de plasticidade;
- Compactação com a energia intermediária - DNER – ME 162/94: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas;
- ensaio de ISC – DNER 172/16: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.

A análise estatística do subleito está apresentada na figura 23.

Figura 23 - Resumo estatístico do subleito

RODOVIA: BR-376/PR TRECHO: Entr. PR-182 (A) (Div. SP/PR) – Div. PR/SC (Entr. BR-101) SUBTRECHO: (Entr. BR-376 (p/Maringá) – Entr. PR-897 (A) (Cont. Sul de Marialva) SEGMENTO: Km 0,00 - Km 32,50 EXTENSÃO: 13,100 km LOTE: 1															
PARÂMETRO ESTATÍSTICO	LIMITES		GRANULOMETRIA								COMPACTAÇÃO 26			GOLPES ISC	IG
	LL	IP	2"	1"	3/4"	3/8"	# 4	# 10	# 40	# 200	h ótima	D máx.	Exp.		
N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	24	24	24	24	15
\bar{X}	54,6	22,1	100,00	100,00	100,00	99,90	99,81	99,65	97,47	87,08	27,35	2	0,26	11,8	
s	9,3	6,1	0,00	0,00	0,00	0,45	0,53	0,59	2,22	10,11	3,71	0,10	0,30	3,9	
μ_{\min}	52,7	20,9	100,00	100,00	100,00	99,81	99,70	99,53	97,01	85,02	26,37	2	0,18	10,8	
μ_{\max}	56,5	23,3	100,00	100,00	100,00	100,00	99,92	99,77	97,92	89,14	28,32	2	0,34	12,8	
X_{\min}	46,4	16,7	100,00	100,00	100,00	99,50	99,34	99,13	95,50	78,15	23,85	1	0,00	8,1	
X_{\max}	62,8	27,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,43	96,02	30,84	2	0,55	15,5	

Fonte: Anteprojeto DNIT (2021)

Em função dos resultados obtidos no estudo estatístico dos solos do subleito, determinou-se o ISC de projeto a ser adotado para o dimensionamento do pavimento, sendo considerado ISC igual a 8%.

4.3.2 Estudo subleito do Projeto B

Para o projeto B foram realizadas sondagens a trado ao longo do trecho e analisado o solo através de ensaios usuais de classificação e de HRB. Para realizar o dimensionamento através do método DNER é necessário o valor de ISC, para o cálculo desse, utilizou seu valor médio no desvio padrão dos valores de ISC das amostras e a distribuição estatística "t" de *Student*. Adotou-se o ISC de 10%.

4.4 Dimensionamento pelo método DNER

4.4.1 Concepção do Pavimento Projeto A

Para o dimensionamento dos pavimentos considerou-se os materiais a serem utilizados de acordo com os comumente utilizados nas rodovias do estado, com sua disponibilidade e adequação ao projeto. Dessa forma a concepção foi realizada sendo:

- Revestimento: Material betuminoso, de concreto asfáltico constituído de capa de rolamento e camada de ligação, com CBUQ (faixa C com CAP 60/85) e CBUQ (faixa B com CAP 50/70), respectivamente;
- Base: Brita graduada simples (BGS);
- Sub-base: Brita graduada simples (BGS).

4.4.2 Dimensionamento do Pavimento Projeto A

No anteprojeto apresenta-se o dimensionamento realizado para o pavimento flexível. Será apresentado e analisado os passos para o cálculo e determinação das camadas realizadas pelos autores do anteprojeto do DNIT em cada trecho, para posteriormente obter um modelo de comparação com outros pavimentos e tipos de dimensionamento.

4.4.2.1 Trecho 1 (km 0,00 a km 6,8)

Para o cálculo da deflexão admissível utilizou-se os três parâmetros apresentados na tabela 17.

Tabela 17 - Parâmetros utilizados para dimensionamento do trecho 1

ISC_{SL}	8,0%
$N_{10^{ano}}$	1,98E+07
Tipos de solo Subleito	II

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

Na tabela 18 são apresentados os resultados encontrados para a deflexão (D_p), as constantes relacionadas as características resilientes dos solos do subleito (I1 e I2) e o resultado do cálculo do valor de espessura mínima do revestimento (H_{cb}).

Tabela 18 Deflexão admissível (D_p), Espessura mínima do revestimento (H_{cb}), constantes relacionadas ao subleito (I1 e I2) no trecho 1

D_p	$47,12 \times 10^{-2}$ mm
I1	1
I2	0
H_{cb}	12,38

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

Considerou o método de dimensionamento DNER, onde a espessura mínima do revestimento betuminoso deve ser de 12,5 cm, uma vez que o Número N está dentro da faixa $N > 5 \times 10^7$.

O valor adotado foi de 12,5 cm, pois o critério da fadiga determina uma espessura superior ao preconizado pelo método DNER. Visando facilitar a execução e divisão das camadas construtivas adotou uma camada de CBUQ de 13,0 cm.

Foram considerados os valores encontrados para o número N e para o ISCP, e com a utilização do manual para dimensionamento do DNIT, através do ábaco, verificou-se que a espessura do pavimento em termos granulares mínima deveria ser de $H_{8,0\%} = 54 \text{ cm}$.

Dessa forma resolveu a inequação utilizada no método DNER, considerando o revestimento em CBUQ ($K=2,0$) e base ou sub-base de material granular ($K=1,0$).

$$R \times K_R + B \times K_B + SB \times K_{SB} \geq H_{SL}$$

$$13,0 \text{ cm} \times 2,0 + B \times 1,0 + SB \times 1,0 \geq 54,0 \text{ cm}$$

$$B + SB \geq 54,0 \text{ cm} - 26,0 \text{ cm}$$

$$B + SB \geq 28,0 \text{ cm}$$

A estrutura do pavimento flexível inicialmente proposta para o trecho 1 está apresentada na tabela 19 abaixo:

Tabela 19 - Estrutura DNER trecho 1

Revestimento (13 cm)	6,0 cm – camada de ligação com CAP 50/70, faixa B
	7,0 cm de camada de rolamento com CAP 60/85, faixa C
Base (14 cm)	14,0 cm de brita graduada (BGS)
Sub-base (14 cm)	14,0 cm de brita graduada (BGS)

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

4.4.2.2 Trecho 2 (km 6,98 a km 9,7)

Para o cálculo da deflexão admissível no trecho 2 utilizou-se os três parâmetros apresentados na tabela 20.

Tabela 20 - Parâmetros utilizados para dimensionamento do trecho 2

ISC_{SL}	8,0%
$N_{10^{ano}}$	1,55E+08
Tipos de solo Subleito	II

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

Na tabela 21 são apresentados os resultados encontrados para a deflexão (D_p), as constantes relacionadas as características resilientes dos solos do subleito (I1 e I2) e o resultado do cálculo do valor de espessura mínima do revestimento (H_{cb}).

Tabela 21 – Deflexão admissível (D_p), Espessura mínima do revestimento (H_{cb}), constantes relacionadas ao subleito (I1 e I2) no trecho 2.

D_p	$40,57 \times 10^{-2} \text{ mm}$
I1	1
I2	0
H_{cb}	15,15

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

Considerou o método de dimensionamento DNER, foi verificado que o revestimento deve ser de 12,5 cm, uma vez que o Número N está dentro da faixa $N > 5 \times 10^7$. No entanto o critério de fadiga determina uma espessura superior ao preconizado pelo DNER, sendo de $15,15 \approx 16,0$ cm que deve ser o adotado.

Foram considerados os valores encontrados para o número N e para o ISCp, e com a utilização do manual para dimensionamento do DNIT, através do ábaco, verificou-se que a espessura do pavimento em termos granulares mínima deveria ser de $H_{8,0\%} = 55,58 \approx 56$ cm.

Dessa forma resolveu a inequação utilizada no método DNER, considerando o revestimento em CBUQ ($K=2,0$) e base ou sub-base de material granular ($K=1,0$).

$$\begin{aligned}
 R \times K_R + B \times K_B + SB \times K_{SB} &\geq H_{SL} \\
 16,0 \text{ cm} \times 2,0 + B \times 1,0 + SB \times 1,0 &\geq 56,0 \text{ cm} \\
 B + SB &\geq 56,0 \text{ cm} - 32,0 \text{ cm} \\
 B + SB &\geq 24,0 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

A estrutura do pavimento flexível inicialmente proposta para o trecho 2 está apresentada na tabela 22.

Tabela 22 - Estrutura DNER trecho 2

Revestimento (16 cm)	10,0 cm – camada de ligação com CAP 50/70, faixa B
	6,0 cm de camada de rolamento com CAP 60/85, faixa C
Base (12 cm)	12,0 cm de brita graduada (BGS)
Sub-base (12 cm)	12,0 cm de brita graduada (BGS)

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

4.4.2.3 Trecho 3 (km 9,7 a km 13,8)

Para o cálculo da deflexão admissível no trecho 3 utilizou-se os três parâmetros apresentados na tabela 23.

Tabela 23 - Parâmetros utilizados para dimensionamento do trecho 3

ISC_{SL}	8,0%
$N_{10^{ano}}$	1,55E+08
Tipos de solo Subleito	II

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

Na tabela 24 são apresentados os resultados encontrados para a deflexão (D_p), as constantes relacionadas as características resilientes dos solos do subleito (I1 e I2) e o resultado do cálculo do valor de espessura mínima do revestimento (H_{cb}).

Tabela 24 - Deflexão admissível (D_p), Espessura mínima do revestimento (H_{cb}), constantes relacionadas ao subleito (I1 e I2) no trecho 3.

D_p	$40,24 \times 10^{-2}$ mm
I1	1
I2	0
H_{cb}	15,31

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

Considerou o método de dimensionamento DNER, foi verificado que o revestimento deve ser de 12,5 cm, uma vez que o Número N está dentro da faixa $N > 5 \times 10^7$. No entanto o critério de fadiga determina uma espessura superior ao preconizado pelo DNER, sendo de $15,31 \approx 16,0$ cm que deve ser o adotado.

Foram considerados os valores encontrados para o número N e para o ISCP, e com a utilização do manual para dimensionamento do DNIT, através do ábaco, verificou-se que a espessura do pavimento em termos granulares mínima deveria ser de $H_{8,0\%} = 55,70 \approx 56$ cm.

Dessa forma resolveu a inequação utilizada no método DNER, considerando o revestimento em CBUQ ($K=2,0$) e base ou sub-base de material granular ($K=1,0$).

$$R \times K_R + B \times K_B + SB \times K_{SB} \geq H_{SL}$$

$$16,0 \text{ cm} \times 2,0 + B \times 1,0 + SB \times 1,0 \geq 56,0 \text{ cm}$$

$$B + SB \geq 56,0 \text{ cm} - 32,0 \text{ cm}$$

$$B + SB \geq 24,0 \text{ cm}$$

A estrutura do pavimento flexível inicialmente proposta para o trecho 3 está apresentada na tabela 25.

Tabela 25 - Estrutura DNER trecho 3

Revestimento (16 cm)	10,0 cm – camada de ligação com CAP 50/70, faixa B
	6,0 cm de camada de rolamento com CAP 60/85, faixa C
Base (12 cm)	12,0 cm de brita graduada (BGS)
Sub-base (12 cm)	12,0 cm de brita graduada (BGS)

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

4.4.3 Concepção do Pavimento Projeto B

O pavimento foi dimensionado em três camadas sendo: revestimento, base e sub-base. Os materiais e coeficientes estruturais foram os seguintes:

- Revestimento: CBUQ faixa C; $K = 2,00$;
- Base: Brita Graduada Simples (BGS); $K=1,1$;
- Sub-base: Brita Graduada Simples (BGS); $K=1,1$;

Os cálculos abaixo mostram exatamente os passos adotados para o dimensionamento:

Adotou-se primeiramente uma espessura de 5 cm de revestimento do tipo CBUQ faixa C.

Então calculou-se através das inequações a espessura de base.

$$R \times K_R + B \times K_B = H_{20}$$

$$5,0 \text{ cm} \times 2,0 + B \times 1,1 \geq 27,0 \text{ cm}$$

$$B = 15,45 \text{ cm}$$

Adotando-se para a base um valor final de 17 cm.

$$R \times K_R + B \times K_B + SB \times K_{SB} \geq H_n$$

$$5,0 \text{ cm} \times 2,0 + 17,0 \text{ cm} \times 1,1 + SB \times 1,1 \geq 41,0 \text{ cm}$$

$$SB \geq 11,18 \text{ cm}$$

Adotando-se como valor para o subleito a espessura de 13,0 cm.

A tabela 26 abaixo mostra o dimensionamento final do pavimento.

Tabela 26 - Estrutura pavimento DNER - Projeto B

Revestimento (5,0 cm)	CBUQ faixa C
Base (17,0 cm)	Brita Graduada Simples (BGS)
Sub-base (13 cm)	Brita Graduada Simples (BGS)

Fonte: Adaptado de DER/PR (2017)

4.5 Hipótese e Abordagem do trabalho

O estudo é do tipo hipotético-dedutiva, a hipótese seguindo algumas bibliografias que apresentam pesquisas semelhantes, como Pitangui (2019) e Sousa (2019), é que se realizada a análise de estruturas dimensionadas pelo método do DNER dentro do software Medina não são verificados os critérios de resistência adequados para a demanda de tráfego e vida útil que se espera (Marconi e Lakatos).

Isso se deve a utilização de um método totalmente empírico e que não considera dados essenciais. Dessa forma visa-se através da simulação obter dados quanto a porcentagem e a intensidade das patologias sobre a estrutura, com uma abordagem qualitativa e quantitativa. Verificando os dados de saída quanto a estrutura do DNER sendo eles a área trincada estimada do pavimento no fim do período de vida útil em porcentagem e o afundamento de trilha de roda.

4.6 Materiais adotados para a simulação pelo método Medina

Os memoriais de projeto trazem apenas uma concepção do pavimento em relação aos materiais. Dessa forma utilizou-se como base essa concepção juntamente com as normativas estabelecidas pelo DNIT que tratam dos materiais utilizados em estruturas de pavimento, como as normas DNIT 031/2006 - ES e a DNIT 129/2011 – EM que tratam dos materiais de concreto asfáltico e concreto asfáltico modificado por polímeros respectivamente, bem como as normas DNIT 139/2010 – ES e DNIT 141/2010 – ES que trazem dados sobre os requisitos de materiais para sub-base e base respectivamente.

Devido a limitação de dados disponíveis a respeito dos materiais que foram adotados no projeto, quando comparados as necessidades do Medina, adotou-se quando necessário materiais similares para realizar os comparativos e as verificações no software. Foram utilizados materiais disponibilizados pelo próprio programa Medina, ou ainda, materiais encontrados na literatura e que apresentavam todos os dados necessários para a inserção no software, mas nunca subestimando os materiais de projeto, utilizando então materiais similares ou superiores em resistência.

4.6.1 Materiais adotados para simulação – Projeto A e Projeto B

4.6.1.1 Material de revestimento

PROJETO A: CBUQ com CAP 60/85, Faixa C e CBUQ com CAP 50/70, Faixa B.

Para o revestimento em CBUQ com CAP 60/85 foi utilizado os dados de Balbo (2013) e ANTT (2016). Já para o CBUQ com CAP 50/70, foi adotado o material já cadastrado no software, sendo o concreto asfáltico do tipo: RJ CAP 50/70 #12,5 mm Sepetiba.

PROEJETO B: CBUQ Faixa C. Para análise pelo software foi utilizado o RJ CAP 50/70 #12,5 mm Sepetiba que também pode ser classificado como de faixa C.

Na tabela 27 a seguir é demonstrado os dados de propriedades dos materiais no software.

Tabela 27 - Propriedades dos revestimentos

Propriedades	CAP 60/85	CAP 50/70
Módulo de Resiliência (Mpa)	5350	8289
Coeficiente de Poisson	0,35	0,30
Resistencia à tração (Mpa)	1,67	1,91
Classe de fadiga	3	1
Fator de fadiga	1,19	0,73
K1	6,0E-8	3,0E-13
K2	-2,69	-3,78

Fonte: Autor (2023)

4.6.1.2 Base e sub-base

Nos dois projetos tanto para base quanto para a sub-base foi adotado em projeto brita graduada simples (BGS). Para fim de dimensionado foram utilizados os materiais já existentes no Medina, sendo o material granular do tipo brita graduada – gnaisse c4 e do tipo brita graduada – gnaisse c3 para base e sub-base respectivamente. As tabelas 28 e 29, mostram as propriedades de cada material adotados.

Tabela 28 - Propriedades Brita Graduada C4

Material	Brita Graduada – Gnaisse C4			
Coeficiente de Poisson	0,35			
Módulo (Mpa)	311			
Massa específica (g/cm ³)	2,296			
Abrasão Los Angeles	41,0			
Coeficientes de regressão	K1	K2	K3	K4
	0,1010	-0,1825	0,9091	0,0753

Fonte: Adaptado de Software Medina (2021)

Tabela 29 - Propriedades Brita Graduada C3

Material	Brita Graduada – Gnaisse C3			
Coeficiente de Poisson	0,35			
Módulo (Mpa)	265			
Massa específica (g/cm ³)	2,111			
Abrasão Los Angeles	41,0			
Coeficientes de regressão	K1	K2	K3	K4
	0,1276	-0,4085	1,050	0,0735

Fonte: Adaptado de Software Medina (2021)

4.6.1.3 Subleito

PROJETO A: Solo com ISC maior ou igual a 8%. Foi realizado estudo de perfil geotécnico em diversos trechos, apresentando algumas alterações ao longo deles. No entanto notou-se a predominância de solo argiloso na região. Portanto para dimensionamento foi adotado no software material já cadastrado, sendo os dados do Solo argiloso LG'(1) utilizados como subleito. Na tabela 30 apresenta-se as propriedades do solo adotado:

-

Tabela 30 - Propriedades solo adotado - Projeto A

Material	Solo Argiloso LG' (1)			
Coeficiente de Poisson	0,45			
Módulo (Mpa)	250			
MCT – Coeficiente c'	1,81			
MCT – Índice e'	1,08			
Massa específica (g/cm ³)	1,665			
Coeficientes de regressão	K1	K2	K3	K4
	0,2060	-0,2400	1,3400	0,0380

Fonte: Adaptado de Software Medina (2021)

Para o PROJETO B foi adotado o mesmo solo a fim de se realizar as análises, já que o solo escolhido atende ao ISC de projeto.

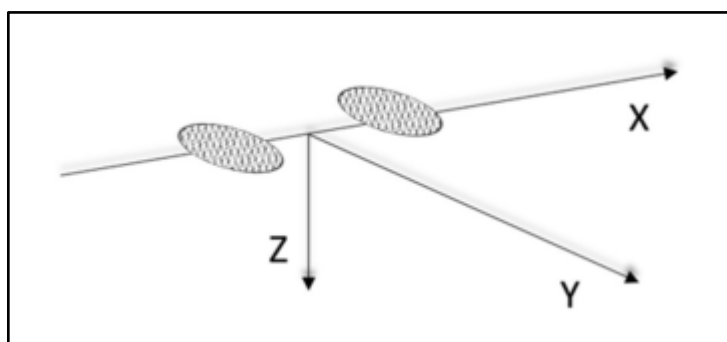
4.7 Análise de tensões AEMC

Por último realizou-se análises no AEMC a fim de obter gráficos e resultados quanto a tensões e deformações que ajudassem a explicar os resultados obtidos quanto as espessuras e avaliações do software Medina.

O AEMC é programa desenvolvido para uso como componente do Medina, através dele é possível realizar análises de camadas elásticas. Os conjuntos básicos de respostas estruturais a partir de equações elásticas que se apresentam são tensões verticais; tensões radiais; tensões tangenciais; tensões de cisalhamento no plano vertical-radial; deflexões verticais e radiais.

Para as análises foi utilizado o carregamento provido do eixo padrão rodoviário. Sempre considerando os eixos x e y em zero e locando os pontos no eixo z de acordo com a análise requerida. A figura 24 mostra como é definido os eixos no programa.

Figura 24 - Sistema de coordenadas AEMC



Fonte: Manual Medina (2020)

Os valores positivos de tensão e deformação indicam que o ponto está em compressão, enquanto os valores negativos indicam que o ponto está em tração.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação do software Medina dos projetos dimensionados pelo método DNER – Projeto A

Foram inseridas as espessuras determinadas pelo método DNER no software Medina. A avaliação ocorreu em acordo com a classificação dos pavimentos, sendo o de sistema arterial primário, que possui confiabilidade de 85%, sendo os limites para área trincada de 30% e de deformação permanente de 13mm. Então os valores avaliados como menores que os de limite foram classificados como satisfatórios e os superiores como insatisfatórios.

5.1.1 Avaliação Trecho 1

Na tabela 31 são apresentados os dados de tráfego para o trecho:

Tabela 31 - Dados de Tráfego Trecho 1

Trecho	Número N – Ano 1	Número N – Ano 20
1	1,73 E+06	4,64 E+07

Fonte: Autor (2023)

Na tabela 32 apresenta-se estrutura realizado pelo método DNER:

Tabela 32 - Estrutura trecho 1 método DNER

Revestimento (13 cm)	6,0 cm – camada de ligação com CAP 50/70, faixa B
	7,0 cm de camada de rolamento com CAP 60/85, faixa C
Base (14 cm)	14,0 cm de brita graduada (BGS)
Sub-base (14 cm)	14,0 cm de brita graduada (BGS)

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

O software Medina não permite a inserção de espessura inferior a 15 cm para base e sub-base, portanto para fins de simulação foram adotadas espessuras de 15 cm e não 14 cm. O lançamento dos dados seguiu da forma apresentada na figura 25.

Figura 25 - Estrutura DNER trecho 1 lançada no software

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	CAP 60/85	6,0	5350	0,35
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	7,0	8289	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C4	15,0	311	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C3	15,0	265	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Argiloso	0,0	250	0,45

Fonte: Autor (2023)

O quadro de resumo da avaliação apresentou a seguinte análise, como mostra a figura 26.

Figura 26 - Resumo da análise trecho 1 - DNER

<p>--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO --- Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.</p> <p>Nível de confiabilidade da análise: 85% Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0% Afundamento de Trilha de Roda: 4,0mm</p> <p>--- ALERTAS --- Tráfego elevado para a estrutura proposta.</p>

Fonte: Software Medina (2021)

Resultado: Satisfatório para afundamento de trilha de roda e insatisfatório para área de trincamento estimada, houve o alerta para tráfego elevado para a estrutura proposta.

5.1.2 Avaliação Trecho 2

Na tabela 33 são apresentados os dados de tráfego para o trecho:

Tabela 33 - Dados de tráfego trecho 2

Trecho	Número N – Ano 1	Número N – Ano 20
2	3,81 E+06	1,02 E+08

Fonte: Autor (2023)

Na tabela 34 apresenta-se o dimensionamento da estrutura realizado pelo método DNER.

Tabela 34 - Estrutura trecho 2 método DNER

Revestimento (16 cm)	10,0 cm – camada de ligação com CAP 50/70, faixa B
	6,0 cm de camada de rolamento com CAP 60/85, faixa C
Base (12 cm)	12,0 cm de brita graduada (BGS)
Sub-base (12 cm)	12,0 cm de brita graduada (BGS)

Fonte: Adaptado de Anteprojeto DNIT (2021)

Mais uma vez as camadas de base e sub-base foram inseridas com espessura de 15 cm cada, sendo o mínimo permitido pelo programa. A figura 27 demonstra como foi lançado a estrutura.

Figura 27 - Estrutura DNER trecho 2 lançada no software

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	CAP 60/85	6	5350	0,35
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	10	8289	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C4	15	311	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C3	15	265	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Argiloso	0,0	250	0,45

Fonte: Autor (2023)

O quadro de resumo de avaliação mostrou a seguinte análise como mostra a figura 28.

Figura 28 - Resumo da análise trecho 2 - DNER

```

--- 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: 3,3mm

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

```

Fonte: Software Medina (2021)

O critério de afundamento de trilha de roda foi satisfeito ($3,3 \text{ mm} < 13 \text{ mm}$), já a área trincada estimada atingiu 99%, devido a estrutura ser insuficiente para o tráfego do trecho.

5.1.3 Trecho 3

Na tabela 35 são apresentados os dados de tráfego para o trecho 3.

Tabela 35 - Dados de tráfego trecho 3

Trecho	Número N – Ano 1	Número N – Ano 20
3	4,01 E+06	1,08 E+08

Fonte: Autor (2023)

Utilizou-se as camadas de base e sub-base com espessura de 15 cm. A concepção do pavimento do trecho 3 é igual ao do trecho 2 (tabela 34), e o lançamento no software ocorreu como apresentado na figura 29.

Figura 29 - Estrutura DNER trecho 3 lançada no software

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	CAP 60/85	6	5350	0,35
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	10	8289	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C4	15	311	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C3	15	265	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Argiloso	0,0	250	0,45

Fonte: Autor (2023)

Os resultados apresentados no quadro de avaliação são os mesmos do trecho 2, figura 28, isso se deve pela estrutura ser exatamente a mesma e o tráfego não ter sofrido grande variação. Portanto no trecho 3, o resultado também foi satisfatório para afundamento de trilha de roda e insuficiente para porcentagem de trincamento na área A estrutura apresentou-se insuficiente para o tráfego.

5.1.4 Análise dos resultados obtidos do Projeto A dimensionado pelo DNER

Percebe-se que a porcentagem de trincamento no revestimento foi maior que o número permitido em todos os trechos. Isso deve-se ao fato de a solicitação de esforço ser alta e a estrutura não comportar a tensão solicitada.

Como a metodologia do DNER é voltada para a proteção da camada de subleito, o revestimento acaba por vezes sendo subdimensionado como nesse caso. Dessa forma a espessura de revestimento é insuficiente para dissipar a tensão, ocasionando deformações resilientes ao longo da superfície.

O trincamento por fadiga, inicia em pontos críticos, onde as tensões são maiores e se propagam por toda a espessura da camada a medida em que o carregamento continua. Esse comportamento reduz o desempenho geral do pavimento e por conseguinte reduz sua vida útil (Ayres, 1997).

As estruturas que foram calculadas através do método empírico DNER são julgadas insuficientes pelo software Medina. Isso demonstra que em uma situação hipotética onde somente esse método empírico fosse utilizado, as estruturas apresentariam patologias no início de sua vida útil. No trecho 3 por exemplo o pavimento excederia a porcentagem admissível de trincamento no mês 24, dos 240 meses de vida útil projetado.

Apresentou-se uma avaliação positiva em relação ao afundamento de trilha de roda, mesmo utilizando um método empírico, sendo o problema relatado sempre referente ao trincamento da área do pavimento.

Em trabalhos similares como o de Pitangui (2019), percebe-se uma mesma característica nos resultados quando realizado a análise da estrutura dimensionada pelo método DNER. Em seu trabalho realizou-se a simulação em dezesseis pavimentos, onde dez apresentaram a porcentagem de área trincada maior que a limite.

Santos (2022) em seu estudo também encontrou uma área de trincamento com 99% para o pavimento analisado. No estudo de caso de Rodrigues (2023), foi constatado que as faixas de estudo também não atenderam ao critério de porcentagem de trincamento por fadiga quando analisados pelo Medina.

Como já esperado, devido ao comportamento mecânico das estruturas, com a tensão no topo sendo um ponto crítico, faz-se necessário um estudo mais detalhado quanto as espessuras das camadas de revestimento a serem adotadas em projetos.

5.1.5 Avaliação do software Medina dos projetos dimensionados pelo método DNER – Projeto B

A tabela 36 apresenta os dados de tráfego referente ao projeto B de estudo.

Tabela 36 - Dados de tráfego Projeto B

Ano	N de projeto (USACE)
2014	3,15E+05
2023	3,62E+06
2030	6,85E+06

Fonte: Autor (2023)

Na tabela 37 encontra-se o dimensionamento da estrutura do pavimento realizado pelo método DNER:

Tabela 37 - Estrutura pavimento Projeto B DNER

Revestimento (5 cm)	5,0 cm de camada de rolamento com CBUQ faixa B
Base (17 cm)	17,0 cm de brita graduada (BGS)
Sub-base (13 cm)	14,0 cm de brita graduada (BGS)

Fonte: Adaptado de DER/PR (2017)

O software Medina não permite a inserção de espessura inferior a 15 cm para base e sub-base, portanto para fins de simulação foram adotadas espessuras de 15 cm e não 14 cm para a sub-base. O lançamento dos dados seguiu da forma apresentada na figura 30.

Figura 30- Estrutura DNER Projeto B lançada no software

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	5,0	8289	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C4	17,0	311	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C3	15,0	265	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Argiloso	0,0	250	0,45

Fonte: Autor (2023)

Realizou-se a primeira simulação para a vida útil de 10 anos a partir de 2014, ou seja, em relação ao número N referente a 2023. O quadro de resumo da avaliação apresentou a seguinte análise, como mostra a figura 31.

Figura 31 - Resumo de avaliação Projeto B – DNER – N2023

--- 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: 40,3%
 Afundamento de Trilha de Roda: 6,6mm

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

Fonte: Software Medina (2021)

A avaliação identificou que o critério de porcentagem de área trincada não seria satisfatório, já que $40,3\% \geq 30,0\%$. O critério quanto ao afundamento de trilha de roda foi satisfeito já que $6,6\text{mm} < 13\text{mm}$.

O projeto B assim como o A, apresentou o alerta de tráfego elevado para a estrutura proposta, pois não atendeu o critério de porcentagem de área trincada. Nesse caso a porcentagem não excedeu muito ao limite, dessa forma há a possibilidade de outro fator ser a causa da deformação que não seja apenas a espessura calculada. Um fator poderia ser a escolha do material de revestimento, de tal forma que se utilizasse outro material com a mesma espessura seria possível obter uma porcentagem de trincamento satisfatório.

Como já mencionado no presente estudo, esse projeto foi entregue totalmente somente no ano de 2021. Não se sabe se ocorreu um redimensionamento em função do novo número N. Mas a fim de demonstração adota-se a hipótese de que a mesma estrutura foi realizada para ter os mesmos dez anos de vida útil a partir de 2021, ou seja, realizou-se agora a avaliação para o N referente ao ano de 2030.

A seguinte análise foi apresentada como mostra a figura 32:

Figura 32 - Resumo de avaliação Projeto B – DNER – N2030

--- 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: 90,8%
 Afundamento de Trilha de Roda: 6,8mm

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

Fonte: Software Medina (2021)

Para esse tráfego a estrutura apresentou resultado pior referente ao trincamento no pavimento, visto que a porcentagem estimada seria próxima da máxima. Já para o afundamento de trilha de roda a estrutura ainda é suficiente.

Como a estimativa de solicitação de carregamento através da quantidade de veículos ocorre utilizando uma taxa de crescimento em progressão geométrica, quando estimado um ano futuro de projeto a solicitação de carregamento é muito maior.

É necessário portanto tomar cuidado ao fato de quando foi efetuado o levantamento de dados para o projeto e quando de fato começará a utilização da rodovia, para que não se subestime o carregamento ao longo da vida útil da estrutura.

5.2 Dimensionamento satisfatório pelo Medina

Utilizou-se os mesmos materiais e número N relativo ao tráfego a fim de que fosse possível verificar quais seriam as espessuras que satisfariam os critérios de parada. O software possui a função “dimensionar”, que aplica a espessura adequada para satisfazer o projeto. Porém ele só modifica uma espessura por vez, ou seja, primeiramente seleciona-se qual camada se quer dimensionar e realiza a operação, sendo que só será modificada a camada selecionada e as demais permanecem imutáveis.

Nas próximas seções serão apresentados os resultados por dimensionamento em cada camada, bem como um dimensionamento manual, alterando mais de uma camada. As células em amarelo referem-se as espessuras que foram alteradas automaticamente pelo software utilizando a função “dimensionar”. Na linha de área trincada estimada, aparecem em vermelho os valores que não foram satisfatórios (maiores que 30%) e em verde o que atenderam ao critério.

5.2.1 Projeto A - Trecho 1

A tabela 38 mostra quais camadas foram alteradas os resultados para os critérios de área trincada e afundamento de trilha de roda no trecho 1.

Tabela 38 - Alteração de uma camada trecho 1 - Medina

CAMADAS	DIM. DNER (cm)	DIM. MEDINA I (cm)	DIM. MEDINA II (cm)	DIM. MEDINA III (cm)
CAP 60/85	6,0	15,0	6,0	6,0
CAP 50/70	7,0	7,0	15,0	7,0
BASE BGS C4	15,0	15,0	15,0	40,0
BASE BGS C3	15,0	15,0	15,0	40,0
Área Trincada Estimada (%)	99,0	34,7	36,8	99,0
A.T.R. (mm)	4,0	2,1	2,1	4,9

Fonte: Autor (2023)

Adotadas as espessuras máximas de revestimento, não foi possível atender os critérios de projeto. Observa-se que mesmo estipulado 15 cm que é o maior valor possível de revestimento no software tanta para o CAP 60/85 quanto para o CAP 50/70 obteve-se área estimada trincada acima de 30%. Verificou-se ainda que a mudança acarretou diminuição no afundamento de trilha de roda.

Para as camadas de base e sub-base com BGS, mesmo utilizando o máximo permitido pelo programa de 40 cm, tanto um por vez ou os dois simultaneamente como mostrado na tabela 38, o critério de área trincada estimada não foi verificado. É possível perceber ainda um aumento de 0,9 mm no afundamento de trilha de roda.

Realizou-se ainda uma alteração de forma manual de modo a modificar a espessura de duas camadas como apresentado na tabela 39.

Tabela 39 - Dimensionamento manual Medina - Trecho 1

CAMADAS	DIM. DNER (cm)	DIM. MEDINA MANUAL (cm)
CAP 60/85	6,0	8,0
CAP 50/70	7,0	14,0
BASE BGS C4	15,0	15,0
BASE BGS C3	15,0	15,0
Área Trincada Estimada (%)	99,0	27,0
Afundamento trilha de roda (mm)	4,0	2,0

Fonte: Autor (2023)

5.2.2 Projeto A - Trecho 2

A tabela 40 mostra quais camadas foram alteradas e quais foram os resultados para os critérios de área trincada e afundamento de trilha de roda no trecho 2.

Tabela 40 - Alteração de uma camada trecho 2 - Medina

CAMADAS	DIM. DNER (cm)	DIM. MEDINA I (cm)	DIM. MEDINA II (cm)	DIM. MEDINA III (cm)
CAP 60/80	6,0	15,0	6,0	6,0
CAP 50/70	10,0	10,0	15,0	10,0
BASE BGS C4	15,0	15,0	15,0	40,0
BASE BGS C3	15,0	15,0	15,0	40,0
Área Trincada Estimada (%)	99,0	37,7	97,7	99,0
A.T.R. (mm)	3,3	1,8	2,2	4,2

Fonte: Autor (2023)

No trecho 2 mesmo utilizando as maiores espessuras no revestimento não foi possível obter um dimensionamento satisfatório alterando as camadas com a função “dimensionar” do software. Novamente alterando as espessuras das camadas de sub-base e base com BGS não houve mudanças nos resultados da avaliação da estrutura.

Quanto as alterações realizadas de forma manual a fim de obter diferentes espessuras em camadas distintas temos o apresentado na tabela 41:

Tabela 41 - Dimensionamento manual Medina - Trecho 2

CAMADAS	DIM. DNER (cm)	DIM. MEDINA MANUAL (cm)
CAP 60/85	6,0	10,5
CAP 50/70	10,0	15,0
BASE BGS C4	15,0	15,0
BASE BGS C3	15,0	15,0
Área Trincada Estimada (%)	99,0	27,5
Afundamento trilha de roda (mm)	3,3	1,7

Fonte: Autor (2023)

5.2.3 Projeto A - Trecho 3

A tabela 42 mostra quais camadas foram alteradas e quais os resultados para os critérios de área trincada e afundamento de trilha de roda no trecho 3.

Tabela 42 - Alteração de uma camada trecho 3 - Medina

CAMADAS	DIM. DNER (cm)	DIM. MEDINA I (cm)	DIM. MEDINA II (cm)	DIM. MEDINA III (cm)
CAP 60/85	6,0	15	6,0	6,0
CAP 50/70	10,0	10,0	15	10,0
BASE BGS C4	15,0	15,0	15,0	40,0
BASE BGS C3	15,0	15,0	15,0	40,0
Área Trincada Estimada (%)	99,0	40,8	99,0	99,0
A.T.R. (mm)	3,3	1,8	2,2	4,3

Fonte: Autor (2023)

No trecho 3 nota-se que quando alterada as espessuras para a máxima permitida pelo software de 15 cm, não é satisfeito o critério de porcentagem de área trincada estimada. Já com os materiais granulares BGS, mesmo que utilizado o limite permitido de espessura a porcentagem estimada de trincamento permaneceu em 99%.

Verificando o dimensionamento de forma manual, pode-se obter as seguintes espessuras de acordo com a tabela 43, para que se atendesse a demanda de tráfego do trecho 3.

Tabela 43 - Dimensionamento manual Medina - Trecho 3

CAMADAS	DIM. DNER (cm)	DIM. MEDINA MANUAL (cm)
CAP 60/85	6,0	10,5
CAP 50/70	10,0	15,0
BASE BGS C4	15,0	15,0
BASE BGS C3	15,0	15,0
Área Trincada Estimada (%)	99,0	29,7
Afundamento trilha de roda (mm)	3,3	1,7

Fonte: Autor (2023)

5.2.4 Resumo de resultados Projeto A

O resultado para a simulação pelo método Medina mostra que para atender os critérios de ruptura da estrutura, seria necessário aumentar consideravelmente as espessuras de revestimentos em todos os trechos.

Pitangui (2019), realizou o redimensionamento pelo Medina em dez pavimentos, e em todos observou a necessidade de aumento significativo da espessura de revestimento.

Silva e Barbosa (2021) também observaram nas duas estruturas estudadas a necessidade de aumento na espessura de revestimento para que pudesse ser satisfeitos os critérios de ruptura pelo Medina.

A tabela 44 apresenta o resumo comparativo das camadas entre os métodos de dimensionamento.

Tabela 44 - Resumo comparativo projeto A

MÉTODO →	DNER		MEDINA		
CAMADAS	TRECHO 1	TRECHOS 2 E 3	TRECHO 1	TRECHO 2	TRECHO 3
<i>CAP 60/85</i>	6,0	6,0	8,0	10,5	10,5
<i>CAP 50/70</i>	7,0	10,0	14,0	15,0	15,0
<i>BASE BGS C4</i>	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
<i>BASE BGS C3</i>	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Área Trincada Estimada (%)	99,0	99,0	27,0	27,5	29,7
A.T.R. (mm)	4,0	3,3	2,0	1,7	1,7

Fonte: Autor (2023)

5.2.5 Projeto B

Na tabela 45 é apresentado lado a lado o dimensionamento realizado pelo DNER, a utilização da função “dimensionar” para a camada de revestimento e uma alteração manual das espessuras das camadas. A tabela apresenta os resultados referentes ao CAP 50/70 como revestimento e o N de 3,62E+06.

Tabela 45 - Comparativo dimensionamentos - Projeto B – N2021

CAMADAS	DIM. DNER (cm) N= 3,62E+06	D.MEDINA (cm) N= 3,62E+06	D.MEDINA MANUAL (cm) N= 3,62E+06
CAP 50/70	5,0	6,6	6,0
BASE BGS C4	17,0	17,0	25,0
BASE BGS C3	15,0	15,0	15,0
Área Trincada Estimada (%)	40,1	29,6	29,7
Afundamento trilha de roda (mm)	6,6	5,8	5,8

Fonte: Autor (2023)

Na função “dimensionar” do próprio software é calculado a espessura de 6,6 cm para revestimento com CAP 50/70 para satisfazer os critérios de fadiga. Quando alterado de forma manual no Medina obteve-se como possível a estrutura com aumento em 1 cm de revestimento CAP 50/70 e mais 8 cm da camada de base de BGS, com esses aumentos seria possível a diminuição da área trincada de 40,1% para 29,7%. É possível observar aqui que o software Medina consegue trazer duas soluções de forma rápida, podendo fazer uma análise econômica em torno dos materiais a serem empregados.

A tabela 46 apresenta os resultados referentes ao CAP 50/70 como revestimento e o N de 6,85E+06

Tabela 46 - Comparativo dimensionamentos - Projeto B – N2030

CAMADAS	DIM. DNER (cm) N= 6,85E+06	D.MEDINA (cm) N= 6,85E+06	D.MEDINA MANUAL (cm) N= 6,85E+06
CAP 50/70	5,0	11,3	11,0
BASE BGS C4	17,0	17,0	25,0
BASE BGS C3	15,0	15,0	15,0
Área Trincada Estimada (%)	90,8	29,1	29,6
Afundamento trilha de roda (mm)	6,8	3,9	4,0

Fonte: Autor (2023)

Como a obra foi entregue no ano de 2021, para ter a vida útil de projeto de 10 anos utilizando os mesmos materiais, seria necessário que a camada de revestimento de CAP 50/70 fosse aumentada para a espessura de 11,3 cm ou ainda para 11 cm com aumento também da camada de base de 17 cm para 25 cm.

Faz-se necessário também apresentar uma avaliação utilizando outro tipo de revestimento, já que o projeto original não apresentou uma especificação quando ao material, apenas quanto a faixa granulométrica. Então para não subestimar o dimensionamento utilizou-se o CAP 60/85, que é um asfalto modificado com polímeros e mais recomendado para camada de rolamento. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 47.

Tabela 47 - Resultados com CAP 60/85 – Projeto B – N2021

CAMADAS	DIM. DNER (cm) N= 3,62E+06	D.MEDINA (cm) N= 3,62E+06
CAP 60/85	5,0	5,0
BASE BGS C4	17,0	15,0
BASE BGS C3	15,0	15,0
Área Trincada Estimada (%)	10,9	11,2
Afundamento trilha de roda (mm)	6,8	6,9

Fonte: Autor (2023)

É possível observar pela avaliação com o CAP 60/85 que mesmo dimensionando pelo método DNER, a estrutura seria adequada para o tráfego proposto. Já que a porcentagem de área trincada estimada foi menor que 30% e o afundamento de trilha de roda inferior a 13mm. Pelo Medina verificou-se que a base poderia ser reduzida em 2 cm, passando de 17 cm para 15 cm, isso na prática geraria a diminuição de custos.

Analisou-se também a estrutura com CAP 60/85 para o número N referente ao ano de 2030 e obteve-se os resultados que seguem na tabela 48.

Tabela 48 - Resultados com CAP 60/85 – Projeto B – N2021

CAMADAS	DIM. DNER (cm) N= 6,85E+06	D.MEDINA (cm) N= 6,85E+06
CAP 50/70	5,0	5,0
BASE BGS C4	17,0	15,0
BASE BGS C3	15,0	15,0
Área Trincada Estimada (%)	24,4	25,2
Afundamento trilha de roda (mm)	7,1	7,2

Fonte: Autor (2023)

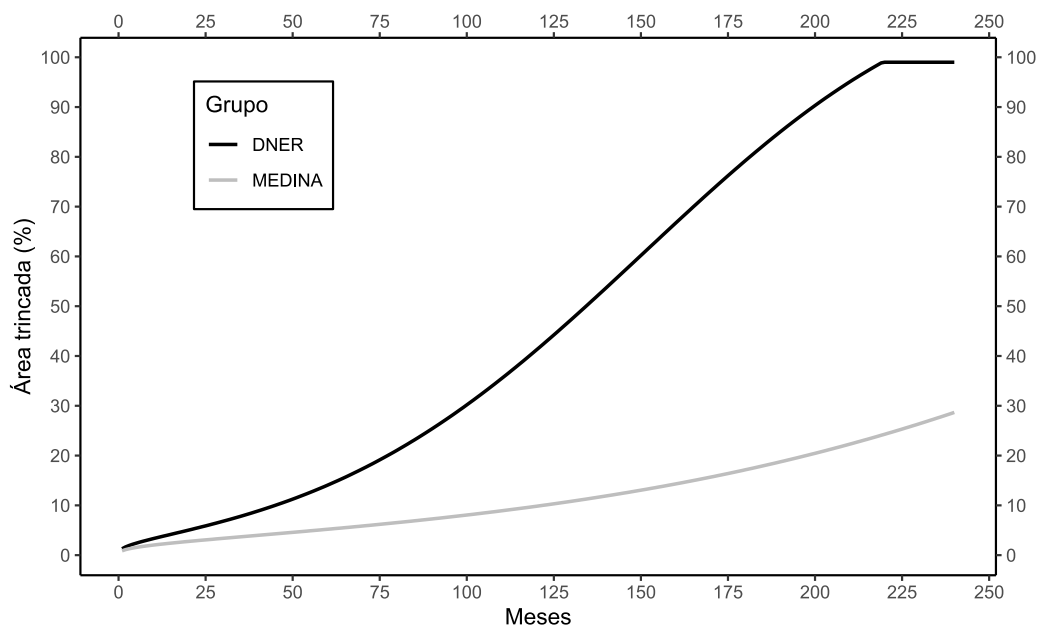
Mesmo sendo dimensionada por um método empírico, a estrutura dimensionada foi suficiente para atender os critérios estabelecidos pelo programa. Avalia-se então para o projeto B que não é uma questão diretamente ligada ao método de dimensionamento, mas sim com a escolha dos materiais, já que para uma camada de revestimento utilizando CAP 50/70 não foi satisfatório a concepção de espessuras e para o CAP 60/85, um revestimento modificado com polímeros elastoméricos, apresentou-se satisfatório.

Há a necessidade então de em projetos de pavimentação apresentar os materiais e propriedades mecânicas necessárias para atender a vida útil do projeto. Percebe-se que utilizando o software Medina essa verificação ocorre de forma direta e ágil, o que representa um ganho importante para os projetistas.

5.3 Área trincada ao longo do tempo

A fim de realizar um comparativo quanto aos métodos utilizados, plotou-se um gráfico de porcentagem de área trincada ao longo do tempo para cada trecho. Foram utilizados os dimensionamentos realizados pelo método DNER e os dimensionados manualmente pelo método Medina. Verificou-se o padrão das curvas para o projeto A apresentado no gráfico 1.

Gráfico 1 - Tempo x Área Trincada - Projeto A

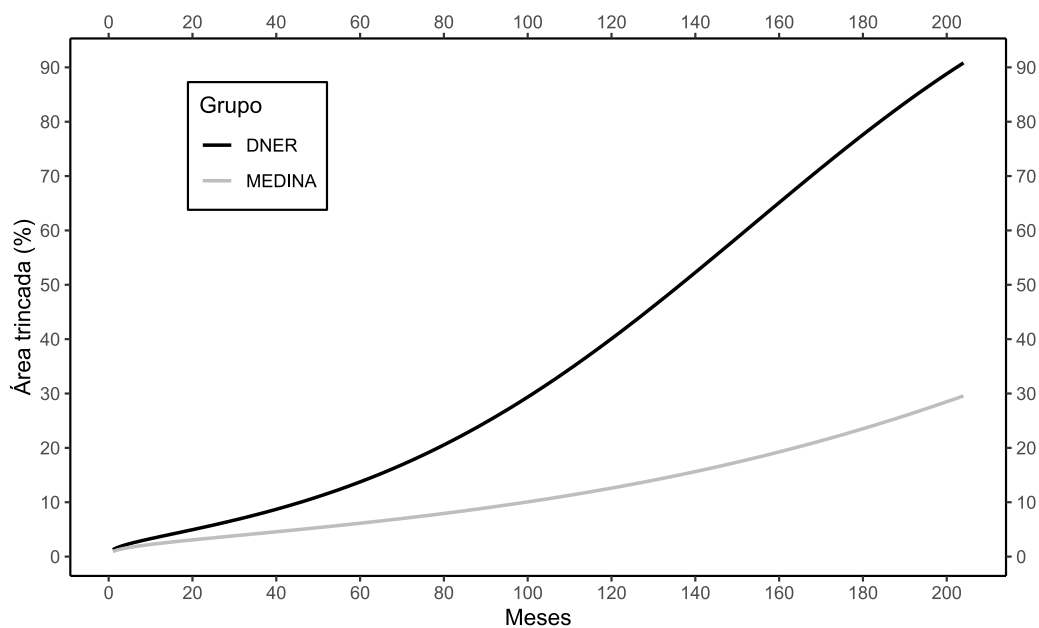


Fonte: Autor (2023).

Nota-se que pela curva em preto referente as estruturas dimensionadas pelo método DNER, a porcentagem de área trincada atinge o limite de 30% com menos da metade da vida útil.

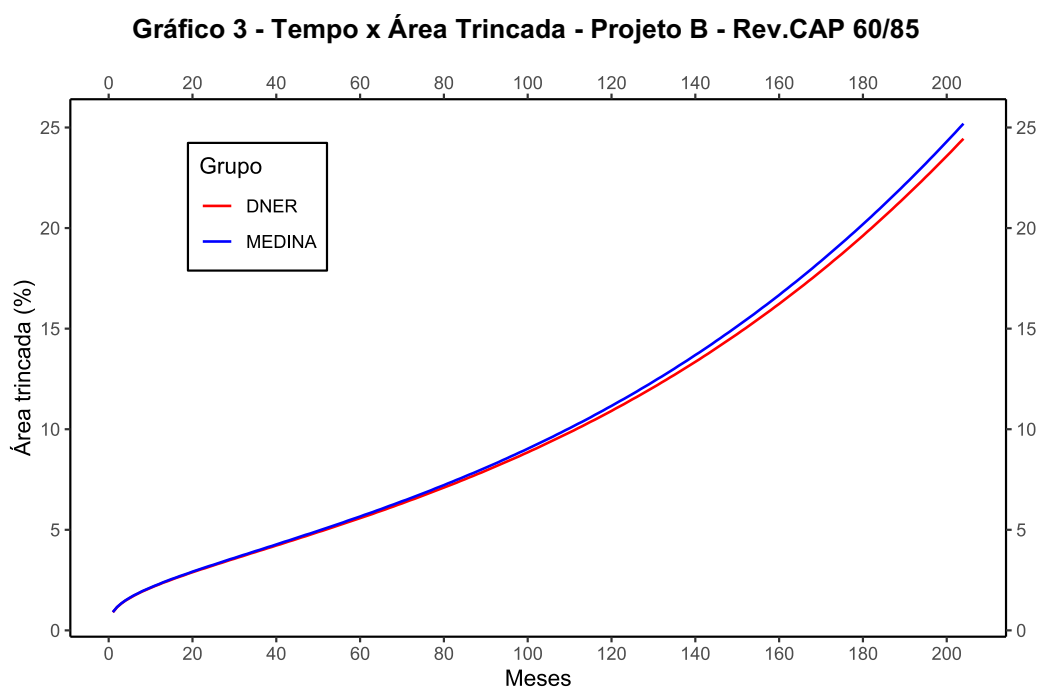
Para o Projeto B plotou-se os gráficos referentes ao N mais crítico, ou seja, projeção para o ano de 2031. O gráfico 2 apresenta o revestimento em CAP 50/70.

Gráfico 2 - Tempo x Área Trincada - Projeto B - Rev.CAP 50/70



Fonte: Autor (2023)

O gráfico 3 apresenta a estrutura com o revestimento com CAP 60/85



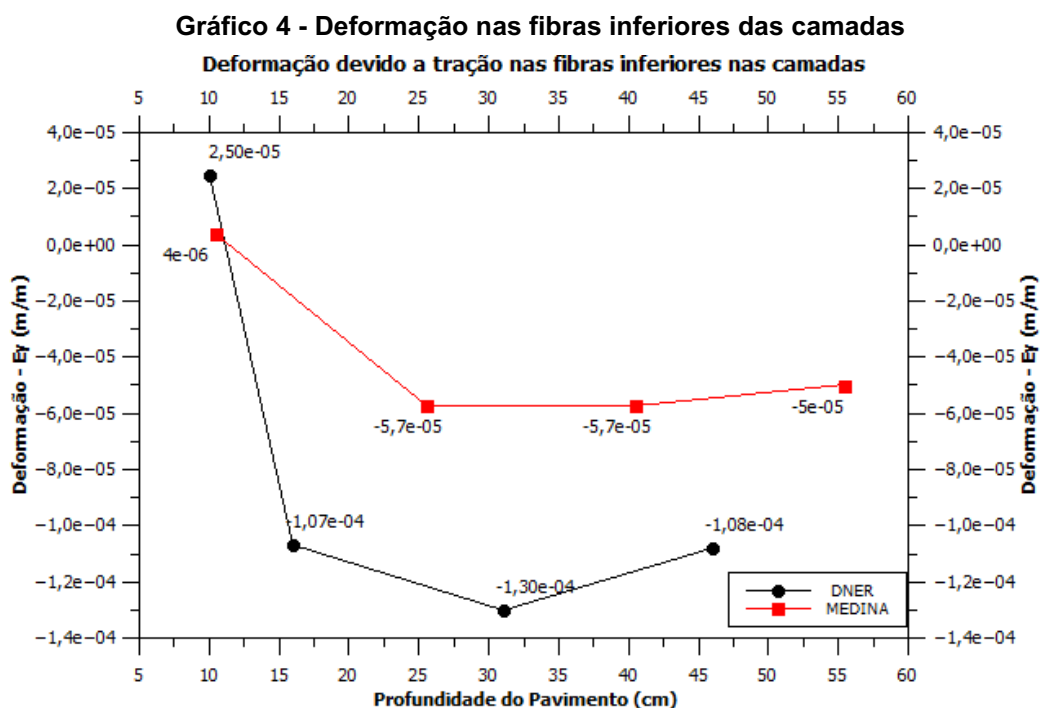
Fonte: Autor (2023)

Como já havia sido apresentado, o revestimento com CAP 60/85 apresentou bons resultados para o dimensionamento, mesmo com o método DNER e utilizando um N para a vida útil de 204 meses. Já com CAP 50/70 foi necessário aumentar a espessura da camada para que a curva no final do período não ultrapassasse 30% da área com trincas.

5.4 Análise de tensões e deformações utilizando o AEMC

Para o projeto A foi adotado para realizar a análise somente o trecho 3 devido ao fato de possuir a maior solicitação de esforço (maior tráfego). Foi verificado as tensões na face mais inferior de cada camada, sendo realizadas tanto para a estrutura dimensionada pelo método DNER quanto para o Medina.

Nessa análise verificou-se as micro deformações nas fibras inferiores de cada camada causada pela tensão de tração, sendo cada rótula o valor das tensões aplicadas no revestimento de CAP 60/85, CAP 50/70, Base e Sub-base de BGS. Lembrando que as espessuras para o trecho 3 pelo método DNER é 6;10;15;15 respectivamente e pelo Medina é 10,5;15;15;15. O gráfico 4 apresenta as deformações encontradas.



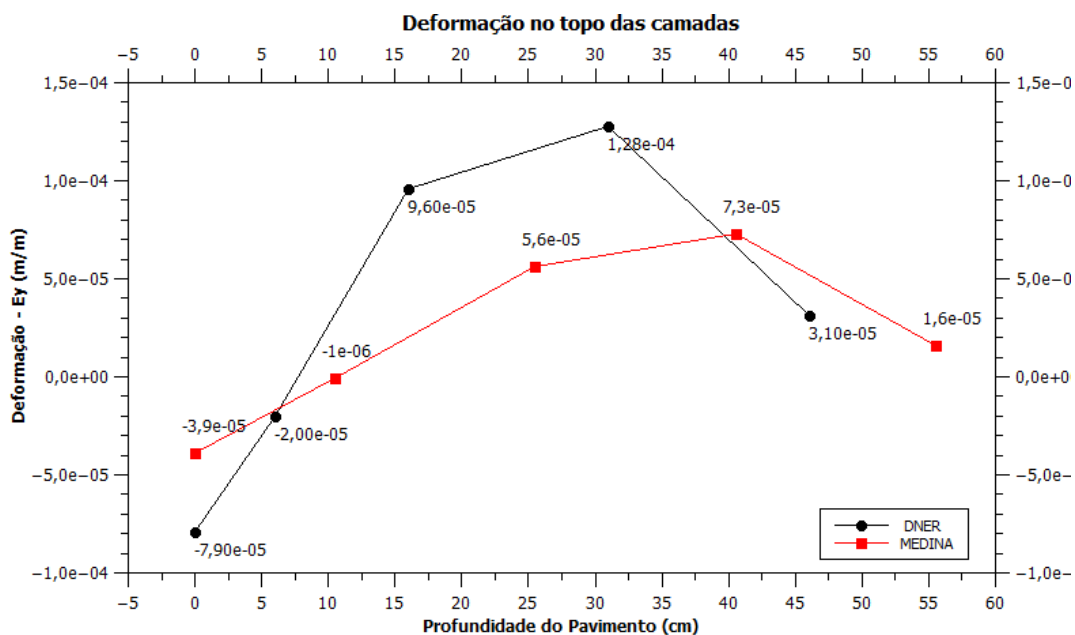
Fonte: Autor (2023)

Analisando o gráfico é possível verificar que a máxima deformação ocorre no fundo da camada de base no modelo do DNER ($-1,30E-04$ m/m), no modelo do Medina a maior deformação ocorre igualmente na fibra inferior da segunda de revestimento e no fundo da camada de base ($-5,70E-05$).

Outro dado importante utilizado por muitos modelos de dimensionamento é a deformação causada por tensão vertical no topo do subleito. Para isso selecionou-se pontos superiores das camadas para verificar quais seriam os resultados. Os dados obtidos são apresentados no gráfico 5.

Nota-se que na última rótula de cada curva (topo do subleito) os valores de deslocamento não são tão diferentes, isso explica o fato de em ambos os métodos o critério de afundamento de trilha de roda ser satisfatório, visto que o deslocamento do topo do subleito é o fator mais importante para provocar esse tipo de patologia.

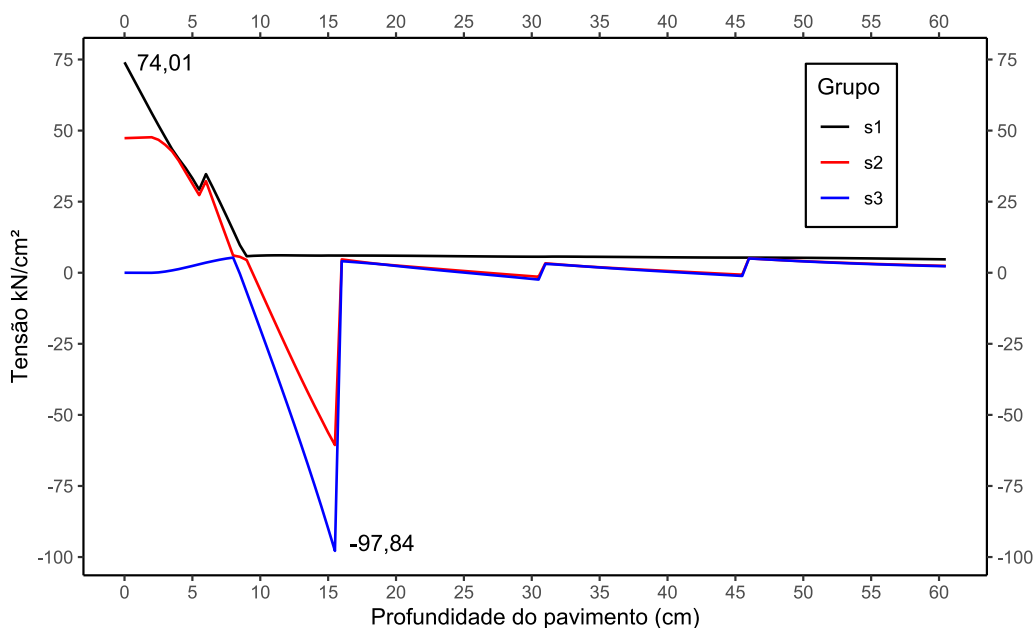
Gráfico 5 - Deformação no topo das camadas



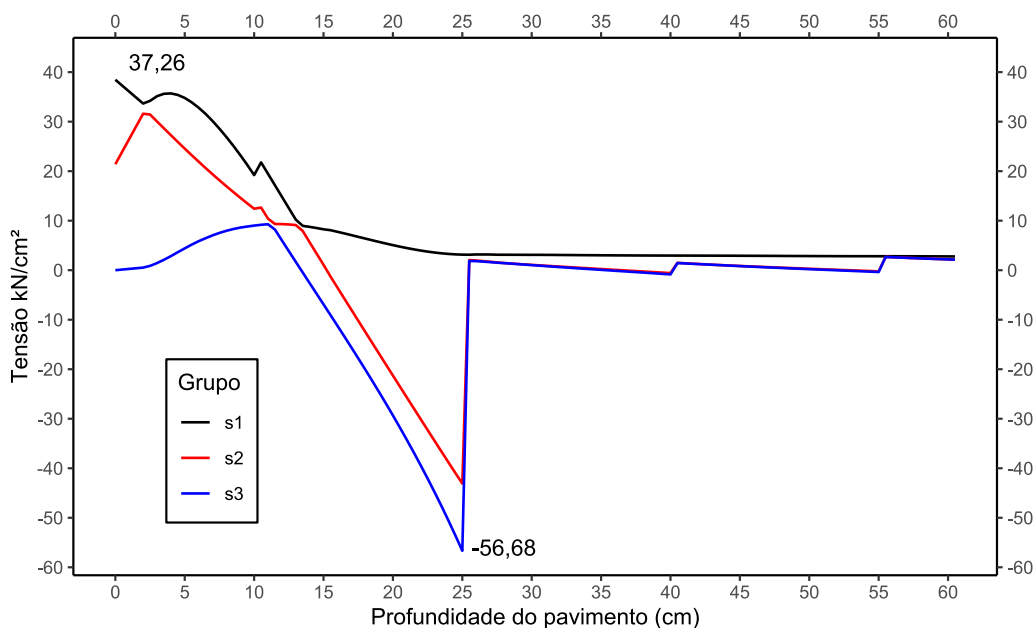
Fonte: Autor (2023)

Plotou-se um gráfico também das tensões principais em gráfico separados, para a estrutura dimensionado pelo DNER (gráfico 6) e pelo Medina (gráfico 7). Foi realizado uma análise estando os pontos em zero tanto no eixo x quanto no eixo y. No eixo z usou-se pontos a cada 0,5 cm.

Gráfico 6 - Tensões principais estrutura dimensionada pelo DNER



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 7 - Tensões principais estrutura dimensionada pelo Medina

Fonte: Autor (2023)

Com os gráficos é possível perceber que as tensões máximas de compressão e tração são maiores na estrutura dimensionada pelo método DNER; $74,01 \text{ kN/cm}^2$ e $97,84 \text{ kN/cm}^2$ respectivamente. Pelo modelo obtido através do Medina tem as tensões máxima de compressão e tração de $37,26 \text{ kN/cm}^2$ e $56,68 \text{ kN/cm}^2$ respectivamente. Em ambos os casos as tensões de compressão máximas ocorrem no topo do pavimento, enquanto as tensões máximas de tração ocorrem na parte superior da base de BGS.

5.5 Análise de N equivalente em função da espessura de revestimento

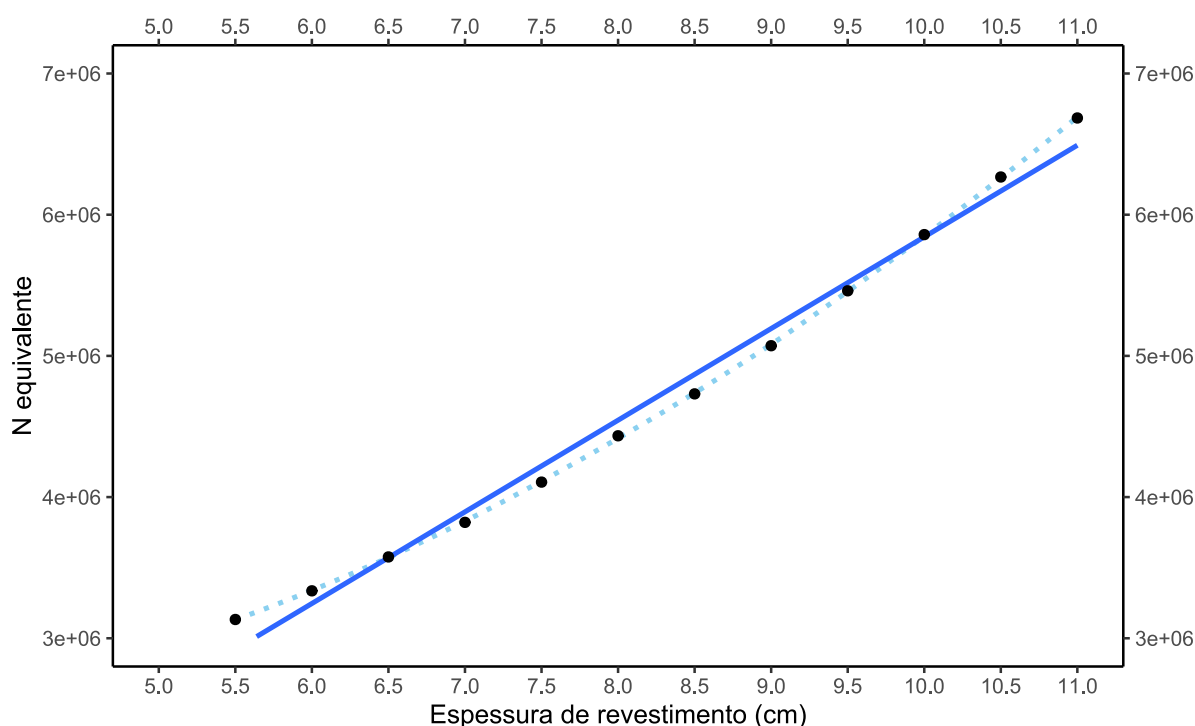
Realizou-se uma análise quanto a camada de CAP 50/70 para o projeto B, realizando uma variação na espessura de 0,5 cm, entre os valores de 5 cm e 11,5 cm. Para analisar o impacto que o aumento em uma única camada pode gerar em relação ao N equivalente, que é apresentado pelo próprio software na aba de danos mensais. Para isso utilizou o N equivalente relativo à porcentagem de trincamento imediatamente inferior a 30%. O modelo utilizado é mostrado na tabela 49. E os resultados obtidos são expressos no gráfico 10.

Tabela 49 – Modelo de simulação N equivalente

CAMADAS	DIM. DNER (cm)
CAP 50/70	5,0 – 11,5
BASE BGS C4	17,0
BASE BGS C3	15,0

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 8 - Espessura x N equivalente

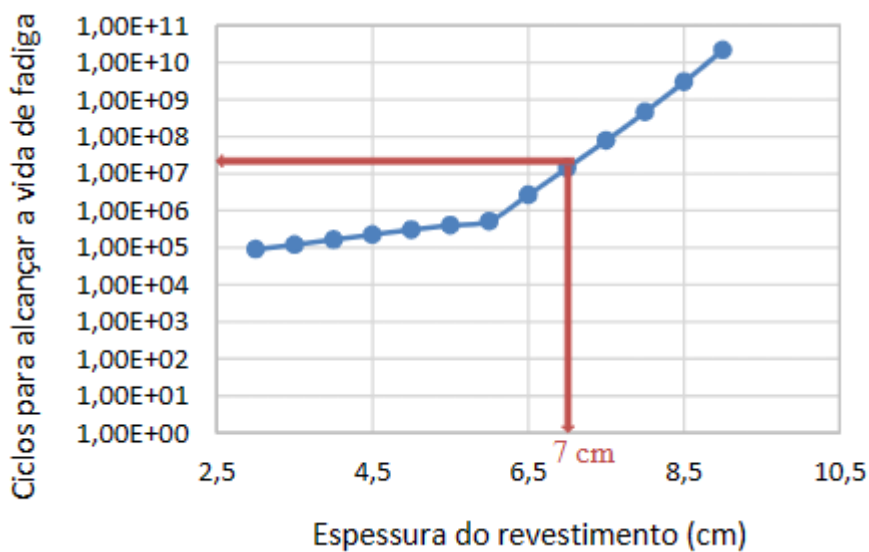


Fonte: Autor (2023)

Analisando por exemplo o N equivalente ao ciclo de vida útil do pavimento quando a espessura do revestimento é 11 cm em relação à quando é 9 cm, nota-se que com o aumento de 2 cm na espessura, é possível obter uma variação de 1,61E+06 ou seja, com o aumento de 2 cm na camada superior de revestimento poderiam ocorrer a passagem de um milhão e seiscentos e treze mil veículos a mais.

Essa variação pode ser ainda maior, de acordo com estudo de PINTARELLI (2017), onde a autora realizou um estudo das micro deformações na fibra inferior de revestimento e utilizou os resultados como dados de entrada em modelos de fadiga. Pela norma europeia EN 12697-24 obteve-se o gráfico apresentado na figura 33.

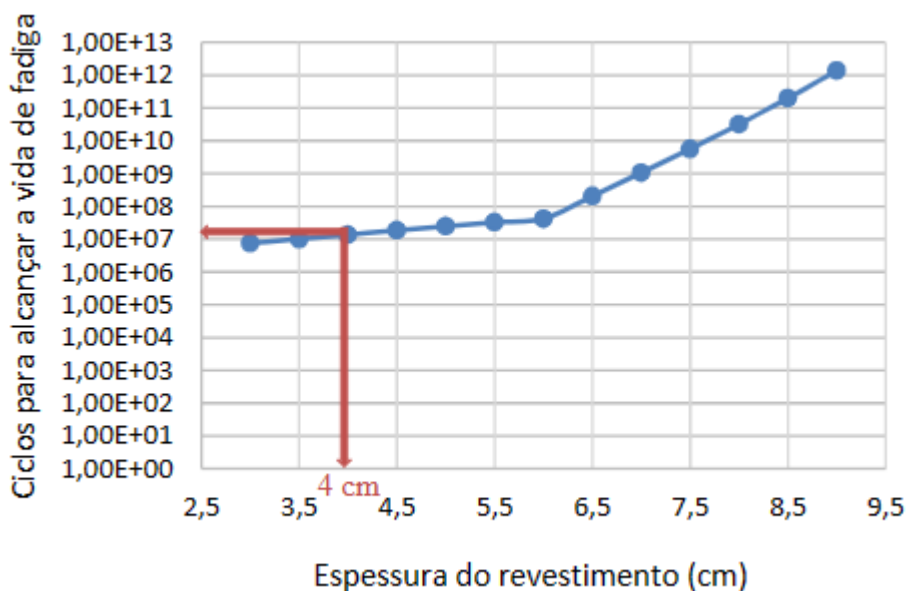
Figura 33 - Ciclo de Fadiga x Espessura de Revestimento – Norma Europeia



Fonte: Pintarelli (2017)

Nota-se que por exemplo entre os pontos de 8 cm e 9 cm haveria um aumento de pelo menos $9,0E+09$ (nove bilhões) em ciclos para alcançar a vida de fadiga. Pela norma americana ASTM D7460 obteve-se as relações apresentadas na figura 34:

Figura 34 - Ciclo de Fadiga x Espessura de Revestimento – Norma Americana



Fonte: Pintarelli (2017)

Pode-se observar que as curvas seguem a mesma tendência, tem maior constância até uma espessura limite e depois crescem quase de forma linear. Se

analisar novamente as espessuras de 8 cm e 9 cm há uma variação na ordem de $9,0E11$, ou seja, ainda maior que pela outra norma.

Vale ressaltar outro detalhe apontado pela autora que seria a diferença de espessura encontrada entre as duas normas em relação aos ciclos. Nota-se que para o N de $1,16 \times 10^7$ do projeto da autora foram encontradas as espessuras de 7 cm e 4 cm respectivamente. Isso demonstra um dos fatores que dificulta a análise de estruturas de pavimento, a grande diferença que se tem em relação a diferentes normas e modelos de fadiga. No entanto dá força a ideia de que o método Medina poderia ser de grande contribuição para a melhora dos dimensionamentos no Brasil se fosse padronizado e aumentassem os estudos em torno do modelo que lhe dá forma.

6. CONCLUSÃO

Durante as pesquisas para realizar o presente estudo foi possível identificar que existe muita divergência em relação aos dados para dimensionamentos de pavimentos flexíveis, que vão desde a contagem de veículos, propriedades de materiais, métodos de dimensionamento, modelos de fadiga e modelos de verificação nas tensões e deformações sobre a estrutura. Nota-se que não existe uma convergência nos dados, sendo que os resultados dos estudos são muito amplos para área, o que dificulta a compreensão real dos problemas quanto a projeção dos pavimentos flexíveis no Brasil.

No entanto é possível concluir que o método mecanicista empírico Medina pode ser um dos pilares para solucionar os problemas relacionados a dimensionamento, pois apresenta uma solução baseada em ensaios mecânicos e leva em consideração propriedades essenciais dos materiais, analisando o módulo de resiliência, modelos de fadiga e deformação permanente. Aumentando os estudos em torno dele, realizando novos ensaios e cadastrando novos materiais que se utilizam frequentemente nas obras de pavimentação no Brasil, a área da pavimentação pode evoluir muito nos próximos anos.

Na análise comparativa com o método DNER pode-se perceber que o método Medina faz uma análise muito mais completa em relação a concepção de pavimentos. Além disso as ferramentas disponíveis através do software facilitam a análise de desempenho, podendo alterar materiais, espessuras, analisar as tensões e deformações e com isso projetar estruturas de forma mais eficiente. No longo prazo acredita-se que com o Medina teremos estruturas mais duráveis e com melhor custo-benefício em relação ao que se encontra hoje nas rodovias brasileiras.

Em relação aos resultados pode-se verificar que utilizar o método DNER não é sinônimo de dano, principalmente quando se trata de pavimentos com nível de tráfego baixo ou intermediário, no entanto traz com ele muita incerteza devido ao fato de não considerar as características dos materiais que serão utilizados. Quanto as rodovias de tráfego elevado, notou-se que a utilização apenas do método DNER é insuficiente. Apesar de muitas empresas que prestam serviços para a execução das rodovias utilizarem ferramentas mecanicistas, observou que há divergência em relação ao modelo apresentado no Medina e que seria importante apresentar nos

memoriais de cálculo dados mais detalhados para a concepção de pavimentos, como por exemplo os resultados de ensaios mecânicos dos materiais a serem utilizados.

É importante destacar que o ideal é realizar as análises com todos os materiais que serão aplicados de fato no projeto, desde o solo até os revestimentos. No presente estudo utilizou materiais similares, buscando não subestimar os materiais que seriam utilizados na prática. Mas nota-se que mesmo para grande volume de tráfego, houve resultados considerados elevados de 99% de área trincada, o que pode não ser condizente com a realidade. Sabe-se que o DNIT, principal órgão regulador das rodovias brasileiras tem projetos em andamento a fim de obter melhor calibração do método Medina. Além disso em várias universidades tem ocorridos pesquisas e estudos em torno do método e de novos materiais.

O software e o modelo Medina trazem uma base sólida para que seja possível desenvolver novos estudos e melhorias nas rodovias Brasileiras, que conforme dados estatísticos não apresentam boas condições em sua maioria. O aperfeiçoamento do modelo, bem como todas as pesquisas realizadas na matéria de pavimentação são de grande valia para um futuro com estruturas seguras e com boa qualidade, gerando menores custos de manutenção e benefícios socioeconômicos para a população em geral.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES; CONSEPA. **Estudo laboratorial do módulo dinâmico de concretos asfálticos convencionais e modificados**, Porto alegre, 2016. Disponível em: <<https://portal.antt.gov.br/documents/20122/0/Estudo+Laboratorial+do+M%C3%B3dulo+Din%C3%A2mico.pdf/36661d95-8fc3-1383-ff0e-62f7ad6ec60a?t=1651067192445>>. Acesso em 18 abr. 2023.
- AYRES, JR.M. **Development of a ratial probabilistic approach for flexible pavement analysis**. 1997. Ph. D. Dissertation (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) – University of Maryland, College Park, 1997)
- BALBO, J.T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos,2007.
- BARBOSA, D. S.; SILVA, D. C. **Análise Comparativa entre o novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MEDINA e o Método DNER**. 2021. 73 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/bitstream/prefix/3428/1/TCC_AnaliseComparativaNovo.pdf>. Acesso em 28 out. 2023.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES; J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. Disponível em <<http://www.abeda.org.br/livro-pavimentacao/>>. Acesso em 26 mar.2021.
- BRANCO, F.; PEREIRA, P; SANTOS, L.P. Pavimentos Rodoviários. Almedina. Coimbra, Portugal, 2006.
- CASSIN ANTUNES, G. **Patologias em estradas ocorridas por compactação deficiente**. Manhuaçu, Minas Gerais,2017.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2022**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2022. Disponível em <<https://cnt.org.br/documento/6b24f1b4-9081-485d-835d-c8aafac2b708>>. Acesso em 15 jun. 2023.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** – Brasília,2017. Disponível em <[Transporte Rodoviário - Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram.pdf \(itl.org.br\)](#)>
- COUTINHO, J.C.P. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto,2011. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2328/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_DimensionamentoPavimentoAsf%c3%a1ltico.pdf>. Acesso em 26 mar.2021.

DALLA ROZA, A.E. **Contribuição para o projeto mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos na região norte do estado do Mato Grosso**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE,2018. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/13410/3/AnaElzaDallaRoza.pdf>> Acesso em 03 abr.2021.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO PARANÁ. **Síntese do projeto executivo – PR/912 acesso à Coronel Domingos Soares**. Paraná, Brasil, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Ministério dos Transportes. 2006. Disponível em <<file:///C:/Users/Usuario/Downloads/386837488-Manual-de-Pavimentacao-05-12-06-pdf.pdf>>. Acesso em 20 abr.2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 184/2018 – ME**. Ministério dos Transportes. 2008. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_184_2018_me-1.pdf>. Acesso em 28 abr.2021

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Ministério dos Transportes. 2020. Disponível em < <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>>. Acesso em 28 abr.2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Anteprojeto de engenharia para as obras de implantação e pavimentação do contorno sul metropolitano de Maringá/PR, com obras de arte na rodovia br-376/PR**. Brasil,2021.

FERNANDES, W.D. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método da AASHTO**. Santa Maria: UFMS, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7929/FERNANDES%2c%20WAGNER%20DAMBROS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 08 abr.2021.

FRANCO, F.A.C.P. **Um sistema para Análise Mecanicista de Pavimentos Asfálticos**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ,2000, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV**, 2007. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

FRANCO, F.A.C.P; MOTTA, L. M. G. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. COPPE/UFRJ,2020, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FRITZEN, M.A. **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos**. Tese de D.Sc.

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/391-2016/4707-marcos-antonio-fritzen>>. Acesso em 29 abr.2021.

FRITZEN, M.A.; FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. ; UBALDO, M. O.; NASCIMENTO, L. A. H. **Classificação de misturas asfálticas quanto a performance à fadiga**. Congresso Rodoviário Português, 2019, Lisboa. 9º CRP, 2019. v. 1. Disponível em: <http://www.crp.pt/docs/A54S222-9CRP_Artigo_33.pdf>. Acesso em 08 abr.2021.

GARDETE, D. C. **Comparação de ensaios laboratoriais para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente**. Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2006. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/277213113_Comparacao_de_ensaios_laboratoriais_para_a_caracterizacao_de_misturas_betuminosas_a_deformacao_permanente> Acesso em 28 abr.2021.

GONÇALVES, F. P. **Estudo experimental do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados**. Tese de Doutorado PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2002. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2300/000367657.pdf>>. Acesso em 10 nov. 2023.

GUIMARÃES, A.C.R. **Um método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/153-2009/1199-antonio-carlos-rodrigues-guimaraes>>. Acesso em 26 abr.2021.

LIMA, J. P.; RAMOS, R.A.R.; FERNANDES JR., J. L. . **A Prática de Gestão de Pavimentos em Cidades Médias Brasileiras**. 2º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável (II Pluris), 2006, Braga, Portugal. Anais do II Pluris. Braga, Portugal: Universidade do Minho, 2006. Disponível em: <<http://redbcm.com.br/arquivos/bibliografia/a%20pr%C3%A1tica%20de%20gest%C3%A3o%20de%20pavimentos%20em%20cidades%20m%C3%A9dias.pdf>>. Acesso em 10 abr.2021.

MARCONI M.A.; LAKATOS E.M. **Fundamentos de metodologia científica**. Atlas edição João Bosco Medeiros - 9. ed. São Paulo, 2023.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível

em: <https://www.researchgate.net/publication/36219069_Metodo_de_dimensionamento_de_pavimentos_flexiveis_criterio_de_confabilidade_e_ensaios_d_e_cargas_repetidas> Acesso em 28 abr.2021.

PINTARELLI, M.G. **Comportamento de misturas asfálticas com relação ao fenômeno de fadiga – Estudo de comparação entre as normas ASTM D7460, AASHTO T321 e EN 12697-24.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/177256>> Acesso em 08 de jun.2023.

PITANGUI, L.C. **Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa.** Monografia de Projeto Final. Universidade de Brasília,2019. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/25932/1/2019_LaraCordeiroPitangui_tcc.pdf>. Acesso em 15 abr. 2021.

RODRIGUES, A. (2023) **Uso do MeDiNa em soluções básicas de pavimentos asfálticos no Distrito Federal.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 189 p. Disponível em <<https://repositorio.cgu.gov.br/handle/1/76978>>. Acesso em 13 nov.2023.

SANTOS, T.F. **Comparações dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis: DNER (1981) e MEDINA.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/243170>>. Acesso em 04 de nov. 2023.

SHOJI, E.S. **Desenvolvimento de um programa de sistema de gerência de pavimentos urbanos para cidades brasileiras de médio porte.** 2000. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. doi:10.11606/D.18.2018.tde-05032018-154814. Acesso em 20 abr. 2021.

SILVA, C. F. S. C. **Análise de Tensões em Pavimentos a Partir de Modelo Físico Instrumentado.** Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014. Disponível em <<http://www.coc.ufrj.br/es/documents2/mestrado/2014/2561-carlos-filipe-santos-correia-e-silva-mestrado>>. Acesso em 14 nov. 2023.

SILVA D.C.; BARBOSA D.S. **Análise Comparativa entre o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos – Medina e o método DNER.** Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Belém, 2021. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/bitstream/prefix/3428/1/TCC_AnaliseComparativaNovo.pdf>. Acesso em 08 mai. 2023.

SILVA, J.E.G. **Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos – Medina, Avaliação da duplicação da AL-145.** Projeto de Graduação do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas. Delmiro Gouveia, Alagoas,2018. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/4810/1/Método%20nacional%20de%20dimensionamento%20de%20pavimentos%20-%20medina>>

%2C%20avaliação%20da%20duplicação%20da%20AL-145.pdf>. Acesso em 04 jun. 2023

SOUSA M.N. **Dimensionamento de Estrutura de Pavimento: Aplicação do Método DNER (1981) e do método MeDiNa**. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/1524/TCC%20-%20Matheus%20Nilton%20de%20Sousa.pdf?sequence=1>>. Acesso em 20 abr.2021.

SOUZA, M. L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, IPR,1981. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/667_metodo_de_projeto_de_pavimentos_flexiveis.pdf> Acesso em 28 abr.2021.