

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL

CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

NATHÁLIA ENÉAS GOMES SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS PELO MÉTODO DO DNER E O MÉTODO MECANÍSTICO-
EMPÍRICO MEDINA EM UM TRECHO DA BR-101/AL**

Monografia de Conclusão de Curso

Maceió

2021

NATHÁLIA ENÉAS GOMES SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS PELO MÉTODO DO DNER E O MÉTODO MECANÍSTICO-
EMPÍRICO MEDINA EM UM TRECHO DA BR-101/AL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte integrante dos requisitos para obtenção de título de Engenheira Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Andressa Ka Yan Ng.

Maceió

2021



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 15 horas e 00 minutos do dia 21 de setembro de 2021, em sala virtual do Google Meet, reuniu-se a banca examinadora para avaliação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do(a) aluno(a) **Nathália Enéas Gomes Silva**, sob o título “**Análise comparativa do dimensionamento de pavimentos asfálticos pelo método do DNER e o método mecanístico-empírico MeDiNa em um trecho da BR-101/AL.**”

composta pelos seguintes participantes:

Orientador: Prof(a) (A₁) Andressa Ka Yan Ng,

Co-orientador Prof(a) -.

Prof(a) Avaliador(a) (A₂) Aline Calheiros Espíndola

Avaliador(a) (A₃) Anthony Gomes dos Santos

A apresentação oral do aluno foi realizada em 30 minutos, findos os quais foi iniciado o debate, perfazendo um tempo total de defesa de 1 hora (s) e 40 minutos.

O aluno obteve média final 9,80 (nove vírgula oitenta).

Abaixo, assinatura do orientador, seguida dos membros da banca, de acordo com a ordem listada acima, todos seguidos da respectiva nota, a assinatura do aluno e a assinatura do Coordenador do TCC.

Prof(a) (A₁) Andressa Ka Yan Ng, nota final 9,80.

Prof(a) (A₂) Aline Calheiros Espíndola, nota final 9,80.

Prof(a) (A₃) Anthony Gomes dos Santos, nota final 9,80.

Aluno: Nathália Enéas Gomes Silva

Coordenador do TCC: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda proteção e força que me deu para superar as dificuldades durante toda essa caminhada.

Aos meus pais e minha irmã, Vanildo, Lucielma e Lara, que são minha base e sempre acreditaram em mim e torceram pelas minhas conquistas, me dando apoio nos momentos difíceis e vibrando nos momentos felizes. Obrigada por aguentarem todos os meus momentos de altos e baixos durante esse processo.

À Universidade Federal de Alagoas por ter me proporcionado, apesar de todas as dificuldades, uma experiência única e desafiadora que contribuiu com a minha evolução pessoal e profissional.

À minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª Andressa Ka Yan Ng, pela sua orientação, apoio, consideração e paciência durante a elaboração desse trabalho, me guiando e dando suporte em todos os momentos.

Ao Centro Acadêmico de Engenharia Civil e a EJEC, por todas as experiências e desafios que pude vivenciar, onde aprendi a ser resiliente e ter vontade de ser cada vez melhor.

Ao meu namorado, Raviere, que durante os 5 anos de graduação esteve ao meu lado me apoiando e acreditando em mim quando nem eu mesma achava ser capaz. Obrigada por todo carinho, paciência e incentivo ao longo dessa caminhada.

Às minhas amigas de infância, Gabi, Kay e Luiza, por mesmo longe se manterem presente em minha vida, estando sempre na torcida e me apoiando em todas as minhas escolhas.

Aos meus amigos mais próximos do IFAL, Larissa, Laily e Flávio, por sempre se fazerem presentes, pelo apoio e confiança de sempre.

Aos meus amigos da faculdade, os mais próximos que estudaram comigo e passaram por todas as dificuldades junto a mim e os de outras turmas, os quais pude compartilhar momentos leves e divertidos, encontrando uma válvula de escape em momentos difíceis.

RESUMO

O modo rodoviário é o principal meio de transporte de cargas e passageiros no Brasil, por isso sua extensa malha requer constantes manutenções para que os pavimentos estejam em boas condições de uso. Dentre os principais problemas apresentados com os pavimentos flexíveis, destaca-se o seu modo de dimensionamento, pois há décadas são utilizados métodos empíricos que desconsideram importantes fatores relacionados a Mecânica dos Pavimentos. Com o objetivo de reduzir essa grande parcela de empirismo, surgiu o estudo com método Mecânico-empírico de dimensionamento de pavimentos. Desta forma, o presente trabalho teve como finalidade analisar e comparar o projeto de pavimentação, dimensionado pelo método do DNER, de um trecho da BR-101/AL, realizando um estudo com os parâmetros obtidos por meio do método do DNER e do *software* MeDiNa. Após as análises, foi possível verificar que o pavimento dimensionado pelo método do DNER não atingiu o desempenho esperado para o tempo de vida útil de 10 anos do pavimento e com isso tornou-se necessário realizar estudos com outras propostas de estruturas a serem dimensionadas para o trecho em questão. Dentre as propostas, verificou-se que a estrutura sem o *binder* apresentou a menor porcentagem para a área trincada (8,1%) ao fim do período de projeto resultando em um menor custo dentre as estruturas. Além disso, verificou-se que o sobrepeso de 12,5% na carga dos eixos comerciais, este permitida pelo CONTRAN, resultou em um aumento na ordem de 50,31% no número N, acarretando em uma redução em 4 anos e meio na vida útil de duas estruturas propostas ao longo deste estudo. Por fim, quanto a viabilidade da aplicação do método de dimensionamento MeDiNa no estado de Alagoas, observou-se que no estado não há laboratórios com os equipamentos necessários para obter os dados necessários para a aplicação do método de forma adequada, evidenciando a necessidade de investimentos neste setor.

Palavras-chave: Pavimentos; Dimensionamento; Mecânico-empírico; MeDiNa.

ABSTRACT

The road mode is the main means of transporting cargo and passengers in Brazil, so its extensive network requires constant maintenance so that the pavements are in good condition for use. Among the main problems presented with flexible pavements, its design mode stands out, as empirical methods have been used for decades that ignore important factors related to Pavement Mechanics. In order to reduce this large amount of empiricism, the study with the Mechanistic-empirical method of pavement design emerged. Thus, the present work aimed to analyze and compare the paving project, dimensioned by the DNER method, of a stretch of the BR-101/AL, carrying out a study with the parameters obtained through the DNER method and the MeDiNa software. After the analyses, it was possible to verify that the pavement designed by the DNER method did not reach the expected performance for the 10-year useful life of the pavement and, therefore, it became necessary to carry out studies with other proposals for structures to be designed for the excerpt in question. Among the proposals, it was found that the structure without the binder had the lowest percentage for the cracked area (8.1%) at the end of the design period, resulting in a lower cost among the structures. In addition, it was found that the overweight of 12.5% in the load of commercial axles, this allowed by CONTRAN, resulted in an increase in the order of 50.31% in the number N, resulting in a reduction in 4 and a half years in useful life of two structures proposed throughout this study. Finally, regarding the feasibility of applying the MeDiNa sizing method in the state of Alagoas, it was observed that in the state there are no laboratories with the necessary equipment to obtain the necessary data to apply the method properly, highlighting the need for investments in this sector.

Keywords: Pavements; Design; Mechanistic-empirical; MeDiNa.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DO PAVIMENTO	15
FIGURA 2 - CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO.....	16
FIGURA 3 - ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO RÍGIDO	19
FIGURA 4 - ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL.	19
FIGURA 5 - DEFORMAÇÃO PELA CARGA NO PAVIMENTO FLEXÍVEL E RÍGIDO	20
FIGURA 6 – ÁBACO FATOR DE CARGA	28
FIGURA 7 - ÁBACO PARA DETERMINAÇÃO DE ESPESSURAS DO PAVIMENTO	32
FIGURA 8 - DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO.....	33
FIGURA 9 - ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO COM TENSÕES, DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS.....	35
FIGURA 10 - CARREGAMENTO CIRCULAR EM UM SISTEMA DE DUAS CAMADAS	37
FIGURA 11 - ÁBACO PARA O CÁLCULO DA DEFLEXÃO CONSIDERANDO UM SISTEMA DE DUAS CAMADAS	37
FIGURA 12 - ESQUEMA DA PROPOSTA DE MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO	39
FIGURA 13 - PAINEL CAUSADA POR TRINCAS POR FADIGA.....	40
FIGURA 14 - AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA	43
FIGURA 15 - EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO ASSUMIDO NO SOFTWARE	46
FIGURA 16 – EIXO DE COORDENADAS MEDINA	47
FIGURA 17 – CURVA SIGMOIDE MEDINA	49
FIGURA 18 – FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PROPOSTA PARA PREVISÃO DE ÁREA TRINCADA.....	50
FIGURA 19 - GRÁFICO DE DEFINIÇÃO FATOR DE FADIGA NA MISTURA ADOTADO PELO MEDINA	52
FIGURA 20 – CLASSES DE MISTURAS ASFÁLTICAS	53
FIGURA 21 – PONTOS DE CÁLCULO PARA DEFORMAÇÃO PERMANENTE	54
FIGURA 22 – TIPOS DE EIXOS E PESOS MÁXIMOS PERMITIDOS	57
FIGURA 23 – MÉTODO DO TRABALHO	58
FIGURA 24 - TRECHO DA BR-101/AL: KM 247,33 - KM 248,61	59
FIGURA 25 – ISC DE PROJETO.....	64
FIGURA 26 – ESTRUTURA DO PAVIMENTO.....	65
FIGURA 27 - TELA INICIAL MEDINA	66
FIGURA 28 – ESTRUTURA INICIAL DO PAVIMENTO.....	69
FIGURA 29 – DADOS DE TRÁFEGO (MEDINA)	70
FIGURA 30 – ANÁLISE DA ESTRUTURA INICIAL DO PAVIMENTO.....	70
FIGURA 31 – EVOLUÇÃO DA ÁREA TRINCADA POR MÊS E N EQUIVALENTE (ESTRUTURA INICIAL).....	72
FIGURA 32 – ESTRUTURA PROPOSTA 1	73
FIGURA 33 – ANÁLISE DA ESTRUTURA PROPOSTA 1	73
FIGURA 34 – ESTRUTURA PROPOSTA 2 PARA EXECUÇÃO.....	74
FIGURA 35 – ANÁLISE DA ESTRUTURA PROPOSTA 2	74
FIGURA 36 – ESTRUTURA PROPOSTA 3 PARA EXECUÇÃO.....	75
FIGURA 37 – ANÁLISE DA ESTRUTURA PROPOSTA 3	76
FIGURA 38 – ESTRUTURA PROPOSTA 1 COM EFEITOS DA SOBRECARGA	79

FIGURA 39 – EVOLUÇÃO DA ÁREA TRINCADA POR MÊS E N EQUIVALENTE (ESTRUTURA PROPOSTA 1 COM SOBRECARGA).....	80
FIGURA 40 – ESTRUTURA PROPOSTA 2 COM EFEITOS DA SOBRECARGA	81
FIGURA 41 – ESTRUTURA PROPOSTA 3 COM EFEITOS DA SOBRECARGA	82
FIGURA 42 – ANÁLISE AL-104 NO MEDiNA	84
FIGURA 43 – ANÁLISE AL-105 NO MEDiNA	85

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DA RELAÇÃO ENTRE O IG E O CBR _{IG}	25
TABELA 2 - GRANULOMETRIA PARA BASE GRANULAR	26
TABELA 3 – FATORES DE CARGA (AASHTO)	29
TABELA 4 – FATORES DE CARGA (USACE)	29
TABELA 5 - COEFICIENTE DE EQUIVALÊNCIA ESTRUTURAL (K)	30
TABELA 6 - ESPESSURA MÍNIMA DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO.....	31
TABELA 7 – CLASSES DE FADIGA	52
TABELA 8 - CRITÉRIOS DE PARADA E CONFIABILIDADE DAS ANÁLISES REALIZADAS PELO MEDINA	54
TABELA 9 - CARACTERÍSTICAS DO TRECHO EM ESTUDO	60
TABELA 10 – CONTAGEM VOLUMÉTRICA POR TIPO DE VEÍCULO	61
TABELA 11 – CÁLCULO DO NÚMERO N (USACE)	61
TABELA 12 – ESPESSURAS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO (MÉTODO DNER)	64
TABELA 13 – ESPESSURAS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO (MÉTODO MECANÍSTICO)	64
TABELA 14 – PROPRIEDADES MECANICISTAS PARA O CAUQ “FAIXA C” AMP 60/85	67
TABELA 15 – PROPRIEDADES MECANICISTAS PARA O CAUQ “FAIXA B” CAP-50/70	67
TABELA 16 – PROPRIEDADES MECANICISTAS PARA A BGTC	68
TABELA 17 – PROPRIEDADES MECANICISTAS PARA A SUB-BASE	68
TABELA 18 – PROPRIEDADES MECANICISTAS PARA A SUB-BASE	69
TABELA 19 – EVOLUÇÃO DOS DANOS NO PAVIMENTO.....	71
TABELA 20 – DEFORMAÇÃO PERMANENTE NAS CAMADAS.....	72
TABELA 21 – MODIFICAÇÃO NAS ESPESSURAS (ESTRUTURA PROPOSTA 2)	74
TABELA 22 – MODIFICAÇÃO NAS ESPESSURAS (ESTRUTURA PROPOSTA 3)	75
TABELA 23 – IMPACTO FINANCEIRO DAS ESTRUTURAS PROPOSTAS	76
TABELA 24 – % DO IMPACTO FINANCEIRO DAS ESTRUTURAS PROPOSTAS	77
TABELA 25 – CÁLCULO NÚMERO N COM EFEITO DE SOBRECARGA.....	78
TABELA 26 – EVOLUÇÃO DOS DANOS NA ESTRUTURA PROPOSTA 1 COM SOBRECARGA.....	79
TABELA 27 – EVOLUÇÃO DOS DANOS NA ESTRUTURA PROPOSTA 2 COM SOBRECARGA.....	81

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - FUNÇÕES DAS CAMADAS DO PAVIMENTO	21
QUADRO 2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS EMPREGADOS NO PAVIMENTO	25
QUADRO 3 – UNIDADES DAS GRANDEZAS FÍSICAS - MEDINA	48
QUADRO 4 – CONDIÇÃO DE ADERÊNCIA DAS CAMADAS	50
QUADRO 5 – MATERIAIS GRANULARES MEDINA.....	56
QUADRO 6 – CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS E PARÂMETROS DE TRÁFEGO	62

GLOSSÁRIO

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
ATR	Afundamento de trilha de roda
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	<i>International Roughness Index</i>
ISC	Índice de Suporte California
ME	Mecanístico-empírico
MeDiNa	Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos
MEPDG	<i>Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide</i>
N	Número de Passagens do Eixo Padrão Rodoviário
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VMD	Volume Médio Diário

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3.	JUSTIFICATIVA	15
4.	REFERENCIAL TEÓRICO	18
4.1	PAVIMENTO	18
4.1.1	<i>Classificação dos Pavimentos</i>	18
4.1.2	<i>Estrutura dos Pavimentos Flexíveis</i>	20
4.2	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	21
4.2.1	<i>Metodologia CBR</i>	22
4.2.2	<i>Método do DNER</i>	23
4.2.3	<i>Métodos mecânicos-empíricos (ME)</i>	34
4.2.4	<i>Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa)</i>	44
4.2.5	<i>Efeito da sobrecarga nos pavimentos</i>	56
5.	MÉTODO	58
5.1	SELEÇÃO DO TRECHO PARA ESTUDO.....	58
5.2	COLETA DE DADOS REFERENTE AO PROJETO EM ESTUDO	60
5.2.1	<i>Estudo de Tráfego</i>	60
5.2.2	<i>Estudos Geotécnicos</i>	63
5.2.3	<i>Determinação da espessura das camadas</i>	64
5.3	APLICAÇÃO NO MEDINA	66
5.3.1	<i>Estrutura do Pavimento e dados de tráfego</i>	66
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
6.1	AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA PROPOSTA	70
6.2	DIMENSIONAMENTO PROPOSTO PELO MEDINA	72
6.2.1	<i>Estrutura Proposta 1</i>	72
6.2.2	<i>Estrutura proposta 2</i>	74
6.2.3	<i>Estrutura proposta 3</i>	75
6.3	IMPACTO FINANCEIRO	76
6.4	VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA SOBRECARGA	77
6.4.1	<i>Estrutura proposta 1</i>	79
6.4.2	<i>Estrutura proposta 2</i>	80
6.4.3	<i>Estrutura proposta 3</i>	82
6.5	VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO MEDINA EM ALAGOAS	83
6.5.1	<i>Estudo de caso – AL-104</i>	83
6.5.2	<i>Estudo de caso – AL-105</i>	84
6.5.3	<i>Pesquisa de laboratórios</i>	85
7.	CONCLUSÕES	86
	REFERÊNCIAS	89
	ANEXO A – DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO PELO MÉTODO DO DNER	92

1. INTRODUÇÃO

O primeiro método de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil foi elaborado na década de 60, intitulado como “Método do DNER”, e foi desenvolvido pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza no extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). O Método é baseado em um modelo semiempírico e foi criado a partir de observações dos danos de deformação no subleito. Após aproximadamente 60 anos, ainda é o método mais utilizado para o dimensionamento dos pavimentos em rodovias brasileiras.

Segundo Coutinho (2011), o atual método apresenta um caráter generalista, pois trata as situações de maneira simplificada, o que resulta em uma análise superficial de parâmetros que influenciam no desempenho funcional e estrutural do pavimento. Fontenele (2011) e Franco (2007) também reforçaram que os métodos empíricos são acompanhados de diversas limitações quando se trata dos efeitos do tráfego nas estruturas, pois os critérios adotados na elaboração dos métodos foram realizados a partir de observações com determinados tipos de pavimento, materiais e condições específicas de clima, que não são necessariamente iguais as características da região de projeto. Além disso, as características dos veículos atualmente são bem diferentes das existentes na época da elaboração do método.

Segundo a Pesquisa de Rodovias de 2019 elaborada pela Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2019), o modo que possui maior participação na matriz de transporte brasileira é o rodoviário, sendo responsável por 61% da movimentação de mercadorias e 95% de passageiros. Essa elevada participação do transporte de cargas na categoria rodoviária influencia diretamente na qualidade dos pavimentos, visto que o sobrepeso é um dos fatores que mais demandam o pavimento e causam impacto na sua durabilidade. No ano de 2021, foi publicada a Medida Provisória nº 1.050, que estabelece uma sobrecarga por eixo com tolerância de até 12,5%, isso quando o veículo está dentro dos 5% de limite para o Peso Bruto Total (PBT).

Desta forma, diante ao aumento de cargas provenientes de veículos que trafegam sobre um pavimento, notou-se a necessidade do estudo de métodos adequados para o dimensionamento dessa infraestrutura. Com o avanço da tecnologia, os estudos voltados para a mecânica de pavimentos buscam reduzir a parcela de empirismo no processo de dimensionamento de pavimentos. O método mecanístico-empírico (ME) tem a capacidade de definir e verificar os pavimentos de acordo com suas diversas características de tráfego e geotécnicas, potencializando o desempenho funcional e estrutural de um pavimento. Com esse

método, o pavimento é analisado como uma estrutura de múltiplas camadas sujeita às ações do tráfego e do clima, em função do carregamento e da resistência dos materiais, relacionando as tensões de tração na camada asfáltica com a formação de trincas no revestimento do pavimento ou as deformações verticais com o desenvolvimento do afundamento de trilha de roda (ATR) (FRANCO, 2007).

Diante do exposto, no ano de 2015 foi firmado um convênio entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) que possibilitou a execução de estudos e pesquisas para elaboração de um novo método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos, resultando posteriormente no *software* MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos, o qual utiliza uma metodologia mecanística-empírica para o dimensionamento de pavimentos flexíveis com base nas análises de tensões, deformações e deslocamentos em todas as camadas do pavimento. Com o uso deste programa, é possível entender o comportamento de todas as camadas do pavimento com base nos princípios da mecânica dos pavimentos, também pode-se observar as principais diferenças em relação ao método do DNER, ao utilizar valores propostos pelo método como entrada e verificando se os resultados apresentados por ele são satisfatórios. Atualmente, o *software* está em fase de calibração pelo DNIT com o programa PRO-MeDiNa, de maneira que possa apresentar uma maior confiabilidade em sua utilização.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise comparativa do dimensionamento pelo método do DNER e pelo método mecanístico-empírico do MeDiNa em um trecho da BR-101 no estado de Alagoas.

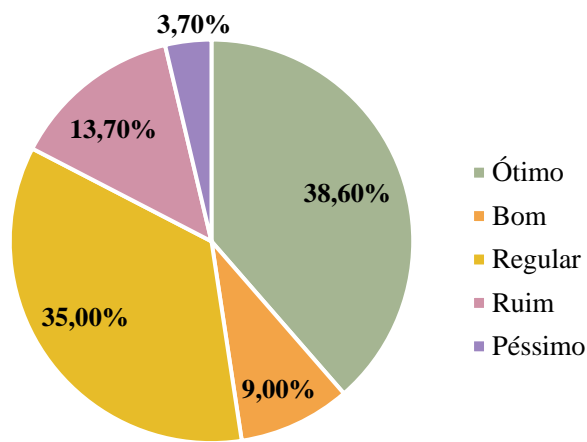
2.2 Objetivos Específicos

- Analisar e comparar os dados do dimensionamento empírico-mecanístico dos pavimentos fornecido pelo software MeDiNa com o método de dimensionamento semiempírico do DNER;
- Observar o impacto financeiro do projeto comparando a estrutura proposta pelo método DNER e o método MeDiNa;
- Avaliar o efeito da sobrecarga nos eixos comerciais no desempenho das estruturas de pavimento propostas pelo método MeDiNa;
- Analisar a viabilidade de aplicar o método de dimensionamento de pavimentos pelo software MeDiNa no estado de Alagoas.

3. JUSTIFICATIVA

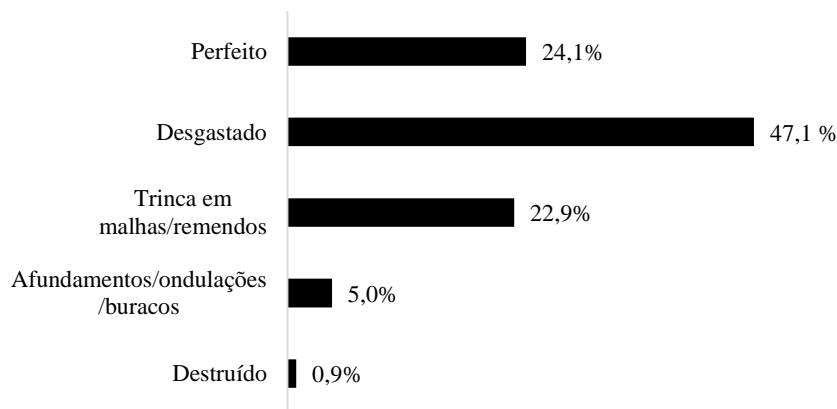
Apesar da importância do modo rodoviário na matriz de transporte do país, dos 1.720.700 km de rodovias no Brasil, apenas 12,4% são pavimentados. Em 2019, a CNT analisou cerca de 108.863 km de extensão de rodovias em todo o país e a partir da análise de dados observados foi possível realizar a classificação geral do pavimento no Brasil, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Classificação do Pavimento



Fonte: Adaptado de CNT (2019)

Como observado na Figura 1, mais da metade dos pavimentos apresentam uma classificação de regular a péssima. A baixa qualidade dos pavimentos proporciona insegurança e desconforto aos usuários, além de um elevado custo para manutenção e restauração dessas infraestruturas. Além da classificação quanto a qualidade do pavimento, a CNT (2019) também realizou uma análise com relação a condição da superfície do pavimento, onde conclui que de toda a extensão avaliada, apenas 24,1% apresenta superfície em perfeito estado de conservação (Figura 2).

Figura 2 - Condição da superfície do pavimento

Fonte: CNT (2019)

Analisando a Figura 2, nota-se que 22,9% refere-se ao defeito de trinca em malhas ou remendos e 5,0% ao afundamento, ondulações e panela. Ambos os problemas podem estar relacionados ao dimensionamento do pavimento, visto que o método do DNER não faz considerações para esses tipos de ocorrências. A partir do que foi supracitado, entende-se que uma das principais variáveis que influenciam na qualidade e na capacidade do pavimento em atender adequadamente as suas funções é a maneira como é executado seu dimensionamento (CNT, 2019).

Em 2017 a CNT publicou um documento intitulado “Por que os Pavimentos das Rodovias do Brasil Não Duram?”, nele foram expostas as possíveis causas da degradação precoce do pavimento rodoviário no país e dentre elas destacou-se o método de dimensionamento utilizado atualmente. No método do DNER não são contempladas teorias sobre o comportamento elástico das camadas nem a comparação de um nível de confiabilidade do projeto. Essa última característica tem o intuito de assegurar que, mesmo em caso de variação das condições estimadas em projeto, é possível ter um desempenho aceitável do pavimento ao longo de sua vida útil (CNT, 2017).

Além disso, anualmente há um grande avanço e investimento nas tecnologias de veículos rodoviários, os veículos mais modernos possuem capacidade de carga mais elevadas do que os veículos considerados na época da elaboração do método do DNER, podendo haver veículos com uma maior capacidade de transporte, principalmente quando se trata de veículos usados no transporte de cargas. Atualmente existem novas técnicas, novos materiais, tipos de veículos e composições de tráfego que devem ser considerados em um dimensionamento de pavimentos, o que evidencia a defasagem do método DNER. Isso pode ocasionar em uma menor

durabilidade do pavimento ou até mesmo um aumento no custo das obras, já que atualmente existem materiais mais eficientes do que os considerados pelo método DNER (CNT, 2017).

Sendo assim, torna-se necessário o estudo comparativo entre os métodos de dimensionamento de pavimentos para compreender melhor as mudanças apresentadas pelo método mecanístico-empírico, como o do programa MeDiNa. Para a realização deste estudo foi selecionado um trecho da BR-101 situado no estado de Alagoas que foi dimensionado a partir do Método do DNER e verificado pelo *software Everstress Pavement Analysis Programs*.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Pavimento

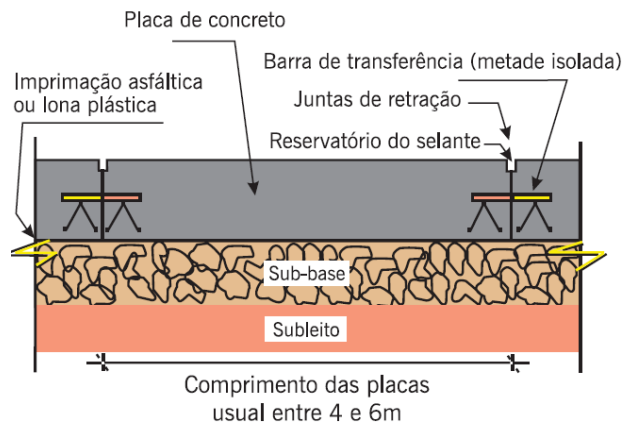
Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A CNT (CNT, 2019), diz que o pavimento tem a função de (i) proporcionar segurança ao tráfego nas rodovias, (ii) suportar os efeitos das mudanças de clima, (iii) permitir deslocamentos suaves na sua superfície, (iv) não gerar desgaste excessivos dos pneus e nível alto de ruídos, (v) possuir uma estrutura durável e resistente ao fluxo de veículos, (vi) permitir o escoamento da água na sua superfície, (vii) possuir sistemas de drenagem eficientes de modo a dar vazão à água da chuva e (viii) ter boa resistência a derrapagens.

4.1.1 Classificação dos Pavimentos

Usualmente os pavimentos são classificados em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Alguns autores também têm empregado a terminologia de pavimentos semirrígidos, que são aqueles com revestimentos flexíveis que possuem em sua camada de base ou sub-base materiais cimentados (BERNUCCI *et al.*, 2008). Nem todos os países consideram essa classificação, já que no Reino Unido, Croney e Croney (1991) utilizam apenas os termos “rígido” e “flexível” para diferenciar o tipo de material usado para a construção da camada de revestimento do pavimento e não quanto a resposta estrutural do pavimento como um todo diante aos esforços oriundos do tráfego. O termo “rígido” é usado para o tipo de pavimento que utiliza do concreto de cimento Portland para construção da camada de revestimento, e “flexível”, para aquele que utiliza do concreto asfáltico como camada de revestimento, sem apresentar o termo “semirrígido” para diferenciar essas duas estruturas, de maneira que o uso de um tipo, eliminaria a possibilidade do outro.

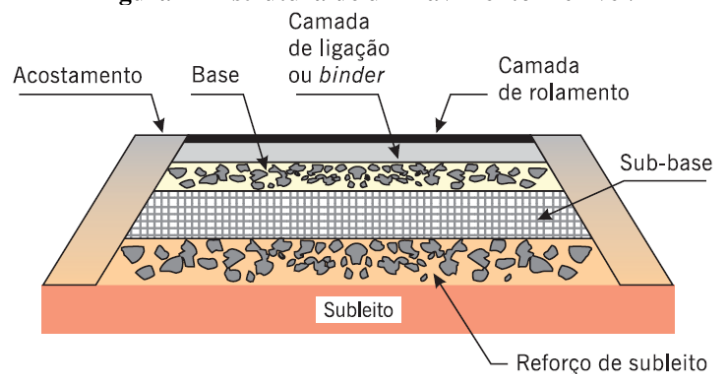
Os pavimentos rígidos (Figura 3) possuem, usualmente, em sua camada de revestimento uma placa de concreto de cimento Portland, que podem ser armadas com barras de aço ou não. Essa placa fica apoiada sobre uma camada de material granular ou material estabilizado com cimento, que é a camada de sub-base, a qual assenta-se sobre o subleito ou revestimento de subleito quando necessária sua utilização (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 3 - Estrutura de um Pavimento Rígido

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

O pavimento flexível (Figura 4) é um tipo de estrutura de pavimento mais presente nas rodovias do país, sendo que o pavimento asfáltico é o tipo mais comum dentro dessa classificação. O pavimento asfáltico tem como camada de revestimento o concreto asfáltico usinado à quente (CAUQ) este que é composto por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos e da presença de volume de vazios entre os agregados recobertos com ligante asfáltico. Geralmente, este tipo de pavimento tem a sua estrutura formada pelas seguintes camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O revestimento asfáltico pode ainda ser dividido em duas camadas, a superior que é de rolamento, a qual tem contato direto com as cargas provenientes das rodas dos veículos e a camada de ligação, que pode ser denominada de *binder*, essa possui um maior índice de vazios tornando o preço da mistura asfáltica mais barata comparada a CAUQ. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 4 - Estrutura de um Pavimento Flexível.

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

A principal diferença entre esses dois tipos de pavimentos é a forma como distribuem os esforços recebidos para o subleito (Figura 5). Segundo Balbo (2007), a atuação das cargas

em um pavimento flexível impõe na estrutura um campo de tensões muito concentrado próximo ao ponto de aplicação da carga, sendo uma carga pontual. Enquanto nos pavimentos rígidos, esse campo de tensões apresenta-se mais disperso, o que proporciona menores pressões sobre o subleito.

Figura 5 - Deformação pela carga no pavimento flexível e rígido



Fonte: CNT (2017)

Apesar da existência dos dois tipos de pavimentos supracitados, de acordo com a CNT (2017), cerca de 99% da malha rodoviária brasileira é constituída por pavimento flexível, sendo este o objeto de estudo do presente trabalho.

4.1.2 Estrutura dos Pavimentos Flexíveis

A estrutura do pavimento flexível é formada por um sistema de camadas que são projetadas para resistir as condições climáticas e as numerosas solicitações de carga provenientes do tráfego durante o período de vida útil do pavimento. As diferentes camadas que compõem a estrutura do pavimento devem resistir aos esforços solicitantes e transferi-los de forma conveniente ao topo do subleito. As tensões e deformações das quais a estrutura do pavimento está sujeita ao longo do seu período de projeto dependem principalmente da espessura das camadas e da rigidez dos materiais que as compõem. Desta forma, os materiais são criteriosamente selecionados de forma a evitar o aparecimento de danos estruturais inaceitáveis que podem acarretar no aparecimento dos principais danos presente em um pavimento flexível, sendo eles: deformação permanente e trincamento por fadiga (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

Como citado no tópico anterior, o pavimento flexível é dividido em algumas camadas principais, mas dependendo do custo para a execução da estrutura do pavimento, pode-se acrescentar camadas auxiliares para torná-lo mais econômico. Segundo a CNT (2019), cada uma das camadas que constituem o pavimento possui funções específicas, que podem ser observadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Funções das Camadas do Pavimento

CAMADA	FUNÇÃO
Revestimento	<ul style="list-style-type: none"> • Destinado a resistir às ações do tráfego; • Deve ser impermeável a fim de evitar que a penetração da água da chuva atinja as demais camadas subjacentes; • Deve ser confortável para melhor atender às condições de rolamento e oferecer segurança ao usuário;
Base	<ul style="list-style-type: none"> • Possui a finalidade de resistir às ações do tráfego de maneira a aliviar as tensões no revestimento e distribuí-las para as camadas inferiores.
Sub-base	<ul style="list-style-type: none"> • Camada complementar à base, com as mesmas funções dessa, executada quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito.
Reforço do Subleito	<ul style="list-style-type: none"> • Camada executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário reduzir espessuras elevadas da camada de sub-base, originadas pela baixa capacidade de suporte do subleito.

Fonte: Adaptado de CNT (2019)

As camadas citadas no Quadro 1 são construídas sobre o subleito, que é o terreno da fundação do pavimento ou o terreno original, portanto não é considerado uma camada.

4.2 Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

Dimensionar um pavimento é definir as espessuras das camadas e os tipos de materiais que serão utilizados em sua estrutura, de maneira que ofereça um desempenho desejável e resista aos esforços atuantes sem que apresente danos consideráveis. Desde o século passado, profissionais dos mais diversos países estudaram técnicas de dimensionamento de pavimentos

flexíveis, gerando uma grande variedade de métodos de cálculo, isso se deve ao fato da grande diversidade de condições ambientais e variação de tráfego entre os locais de estudo.

De acordo com Balbo (2007), grande parte dos métodos de dimensionamento são adaptações de métodos básicos, apenas acrescentando um pouco de empirismo devido as condições do local de estudo. Porém, para ele, a principal razão da diferença entre os métodos, é a falta da definição de um critério único de ruptura da estrutura, pois esta é dividida em três tipos básicos: ruptura plástica, que acontece quando a estrutura do pavimento não suporta de forma adequada as cargas aplicadas e apresenta excessiva deformabilidade plástica, ruptura estrutural ou por fadiga, e ruptura funcional ou operacional, que ocorre quando o pavimento não serve mais ao usuário, em termos de conforto e segurança ao rolamento.

Balbo (2007) explicita que existem três critérios que são utilizados como base dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, sendo eles:

Método empírico: é oriundo da observação do estado de condição dos pavimentos de acordo com parâmetros medido em campo;

Método semiempírico: fruto da extrapolação e expansão de resultados empíricos com base em uma teoria analítica consistente;

Método mecanístico-empírico: é a calibração entre modelos teóricos com dados experimentais obtidos em campo e em laboratório.

4.2.1 Metodologia CBR

A metodologia CBR foi elaborada a partir do estudo sobre condições das rodovias no estado da Califórnia, onde analisaram os fatores que podem ter influenciado as rupturas presentes no pavimento desses locais. Constatou-se que as principais causas das rupturas foram devido à má compactação do solo, excesso de umidade no subleito, espessuras de base insuficientes e as bases compostas por materiais com pouca resistência a tensão cisalhante. Com esses fatos, notou-se a necessidade de um método de dimensionamento que analisasse e levasse em conta as características que influenciam no desempenho estrutural, criando-se para esse fim o ensaio CBR (COUTINHO, 2011).

O CBR foi o primeiro método de dimensionamento de pavimentos flexíveis criado sobre bases estritamente empíricas, possuindo uma grande quantidade de avaliações experimentais e

laboratoriais, devido a sua simplicidade e rapidez de execução. Na época do estudo, foram selecionados os melhores materiais granulares utilizados em bases de pavimentos com bom desempenho nas pistas da Califórnia e com isso, a média da resistência para a penetração no ensaio CBR foi estabelecida como sendo o valor de referência, equivalente a 100% (BALBO 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008; COUTINHO, 2011).

A capacidade de suporte CBR foi correlacionada empiricamente com o desempenho das estruturas de pavimento, levando a um método de dimensionamento que determina espessuras mínimas da estrutura dependendo do índice de suporte do subleito, de maneira que limite as tensões que chegue até o topo do subleito protegendo do processo de ruptura (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Motta (1991) diz que o ensaio de penetração CBR é um marco na história da engenharia de pavimentação mundial, pela simplicidade de execução e a utilização de equipamento portátil no campo.

4.2.2 Método do DNER

O método do DNER de dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos foi elaborado pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza em meados de 1960, com uma última edição em 1981. O modelo foi baseado no trabalho “*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*” desenvolvido pela USACE, juntamente com as conclusões obtidas na pista experimental da *Associations of State Highway and Transportations Official* (AASHTO) (SOUZA, 1981).

Segundo Motta (1991), a maioria dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis têm uma forte dose de empirismo. O método de dimensionamento do DNER, que é utilizado para calcular os pavimentos brasileiros é uma variante do critério do CBR e é baseado na simulação de efeitos de repetições de carga de um eixo-padrão rodoviário de 8,2 tf. Também são adotados coeficientes de equivalência estrutural e fatores climáticos regionais, baseando-se nos resultados obtidos na pista experimental da AASHTO, porém utilizando algumas adequações julgadas oportunas para pavimentos no Brasil (BALBO, 2007; MEDINA, 1995; SOUZA, 1981).

De acordo com Coutinho (2011), a metodologia do DNER foi desenvolvida considerando os seguintes itens: (i) capacidade de suporte do subleito, (ii) classificação dos

materiais granulares empregados no pavimento, (iv) análise de tráfego, (v) coeficiente estrutural e (vi) espessura mínima do revestimento.

- **Capacidade de Suporte**

A determinação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais granulares constituintes da estrutura do pavimento é realizada através do CBR, adotando-se o método de ensaio preconizado pelo DNER em corpos-de-prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições de massa específica e umidade especificadas para o serviço no campo (SOUZA, 1981)

Conforme mencionado por Souza (1981), quando se desejar e for justificável uma segurança maior, em vez do CBR, pode-se usar um CBR corrigido em função do Índice de Grupo (IG), que é denominado Índice de Suporte (IS) (Eq. 1). O IG classifica o solo de acordo com sua capacidade de suporte e é dado por um número inteiro que varia de 0 a 20, pode ser calculado em função da porcentagem de solo que passa na peneira nº 200, do limite de liquidez (LL) e do índice de plasticidade (IP), como pode ser observado na Eq. 1.

$$IS = \frac{CBR + CBR_{IG}}{2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Contanto que $IS \leq CBR$, sendo,

CBR = valor do CBR determinado no ensaio respectivo e nas condições descritas anteriormente;

CBR_{IG} = capacidade de suporte do solo corrigida em função de IG, pode ser obtido na Tabela 1.

O índice de grupo pode ser calculado por:

$$IG = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot a \cdot c + 0,01 \cdot b \cdot d \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

a = % de material que passa na peneira nº 200, menos 35. Se a % obtida nesta diferença for maior que 75, adota-se 75; se for menor que 35, adota-se 35. (“a” varia de 0 a 40).

b = % de material que passa na peneira nº 200, menos 15. Se a % 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 - Valores da relação entre o IG e o CBR_{IG}

Índice de Grupo (I.G.)	C.B.R. I.G.
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: Souza (1981)

- **Classificação dos materiais empregados no pavimento**

Segundo Souza (1981), os materiais utilizados nas camadas do pavimento devem ter as características apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Características dos Materiais Empregados no Pavimento

CAMADA	CRITÉRIOS
Material de subleito	CBR \geq 2% Expansão \leq 2%
Material para reforço do subleito	CBR maior que o do subleito Expansão \leq 1%
Material para sub-base	CBR \geq 20% Expansão \leq 1% (medida com sobrecarga de 10 lb) IG = 0

CAMADA	CRITÉRIOS
Material para base	$CBR \geq 80\%$ Expansão $\leq 0,5\%$ (medida com sobrecarga de 10 lb) $LL \leq 25\%$ $IP \leq 6\%$

Fonte: Souza (1981)

Souza (1981) reforça que caso o Limite de Liquidez (LL) seja superior a 25% e/ou o IP seja superior a 6%, o material pode ser empregado em base (se satisfizer as demais condições expostas no Quadro 2, desde que o equivalente de areia seja superior a 30%. Além disso, os materiais para base granular devem se enquadrar em uma das faixas granulométricas exibidas na Tabela 2 (DNIT, 2006).

Tabela 2 - Granulometria para Base Granular

Tipos Peneiras	Para $N > 5 \times 10^6$		Para $N < 5 \times 10^6$				Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 7
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 7
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 7
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 7

Fonte: DNIT (2006)

A fração que passa pela peneira nº 200 deve ser inferior a 2/3 da fração que passa pela peneira nº 40. A fração graúda deve apresentar um desgaste no ensaio Los Angeles igual ou inferior a 50, podendo haver um desgaste maior, desde que tenha experiência no uso do material (DNIT, 2006).

- **Análise de tráfego**

O pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido. Os fatores de equivalência de operação entre eixos simples e em “tandem”, com diferentes cargas e o eixo simples padrão rodoviário com carga de 8,2t (18.000 lb) podem ser observados na Figura 6 (SOUZA, 1981).

O cálculo do número N depende do volume médio diário e volume total de tráfego em um sentido da via, que podem ser calculados através das equações abaixo.

$$V_m = \frac{V_1 \left[2 + \frac{(P-1)t}{100} \right]}{2} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo,

V_1 = volume médio diário de tráfego no ano de abertura em um sentido da via;

P = período de anos;

t = taxa $t\%$ de crescimento anual em progressão aritmética.

Sendo assim, o volume total de tráfego em um sentido, durante o período será:

$$V_t = 365 \times P \times V_m \quad (\text{Eq. 4})$$

Admitindo uma taxa $t\%$ de crescimento anual em progressão geométrica, o volume total de tráfego, V_t , é:

$$V_t = \frac{365V_1 \left[\left(1 + \frac{t}{100} \right)^P - 1 \right]}{\frac{t}{100}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Logo, o cálculo do número N é realizado através da seguinte equação:

$$\begin{aligned} N &= V_t \times (FE) \times (FC) \\ (FE) \times (FC) &= FV \\ \therefore N &= V_t \times FV \end{aligned} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde,

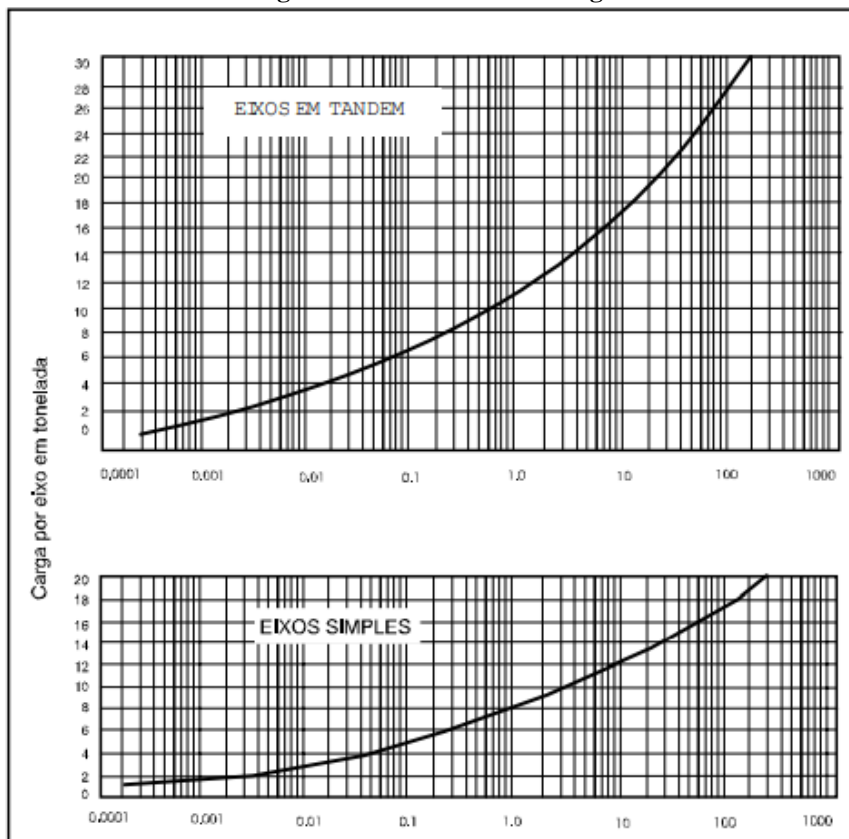
F.E = fator de eixos, um número que multiplicado pelo número de veículos dá o número de eixos correspondentes;

FC = fator de carga, um número que multiplicado pelo número de eixos que operam, dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão;

FV = fator de veículo, número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá, diretamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

Devido à grande variação das configurações de eixos no tráfego do setor rodoviário, torna-se necessário um fator que permita a conversão de diversas solicitações de diferentes eixos em um número equivalente de solicitação padrão. Ou seja, diferentes tipos de eixos são comparados com relação ao potencial destrutivo causado ao pavimento. O fator de equivalência de cargas, ou fator de cargas, realiza a conversão do eixo através de relações empíricas já estabelecidas e que foram transformadas em ábacos, para o caso de eixos simples ou duplos, e em tabelas, para o caso de eixos triplos, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Ábaco fator de carga



Fonte: DNIT (2006)

Baseando-se no conceito de perda de serventia, a AASHTO criou modelos empíricos para o fator de carga (Tabela 3).

Tabela 3 – Fatores de Carga (AASHTO)

Tipo de Eixo	Equação (para P em kN)
Eixo simples de rodas simples	$F = \left(\frac{P}{76,20}\right)^{4,32}$
Eixo simples de rodas duplas	$F = \left(\frac{P}{80,12}\right)^{4,32}$
Eixo tandem duplo	$F = \left(\frac{P}{147,88}\right)^{4,14}$
Eixo tandem triplo	$F = \left(\frac{P}{225,06}\right)^{4,22}$

Fonte: DNER PRO 159/85 (1985)

Além do FC da AASHTO, também foi desenvolvido o fator de equivalência de carga pelo método USACE (Tabela 4).

Tabela 4 – Fatores de Carga (USACE)

Tipo de Eixo	Faixas de cargas (t)	Equação (para P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0-8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0-11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem triplo	0-18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{43,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,5789}$

Fonte: DNIT IPR 723 (2006)

Outro coeficiente que é considerado por Souza (1981) é o fator climático regional (FR), que leva em conta as variações de umidade dos materiais presentes no pavimento durante as estações do ano, para fazer essas considerações no dimensionamento do pavimento, o número N deve ser multiplicado por esse coeficiente. Na pista experimental da AASHTO, o FR variou de 0,2 (baixos teores de umidade) até 5,0 (materiais praticamente saturados). No Brasil o valor adotado é de FR=1,0, devido aos resultados de pesquisas desenvolvidas no IPR/DNER.

Sendo assim, a equação para cálculo do número N se apresenta da seguinte forma:

$$N = V_i \times FV \times FR \quad (\text{Eq. 7})$$

O cálculo do fator de veículo (FV) é realizado através dos FV individuais (FVi) para as diferentes categorias de veículos, conforme pode ser visto na equação 8.

$$FV = \frac{\sum (P_i) \times (FV_i)}{100} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde,

Pi = percentagem em que cada categoria de veículos ocorre na estrada;

FVi = fator de veículo individual para cada categoria de veículo.

O DNIT classifica os diferentes veículos nas seguintes categorias:

- a) automóveis;
- b) ônibus;
- c) caminhões leves, com dois eixos simples, de rodas simples;
- d) caminhões médios, com dois eixos, sendo o traseiro de rodas duplas;
- e) caminhões pesados, com dois eixos, sendo o traseiro "tandem";
- f) reboques e semi-reboques: as diferentes condições de veículos, em unidades múltiplas.

Os fatores de veículos individuais para automóveis e caminhões leves (embora calculáveis) são desprezíveis, interessando especialmente, os FVi para caminhões médios, pesados e reboques e semi-reboques (DNIT, 2006)

- **Coefficiente estrutural**

O coeficiente de equivalência estrutural (K) é um valor que caracteriza os materiais de acordo com a capacidade de cada um deles de resistir a tensões e distribuí-las ao longo de sua espessura. Esses valores foram baseados na metodologia da AASHTO e modificados pelo Eng. Murillo Lopes de Souza, que teve como referência o material de base granular como valor unitário (COUTINHO, 2011).

Na Tabela 5 pode-se verificar os valores de coeficiente de equivalência estrutural de acordo com os materiais.

Tabela 5 - Coeficiente de Equivalência Estrutural (K)	
Componentes do pavimento	Coefficiente 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

Componentes do pavimento	Coefficiente K
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: DNIT (2006)

De acordo com Souza (1981), os coeficientes estruturais de cada camada são designados por:

- a) Revestimento: K_R
- b) Base: K_B
- c) Sub-base: K_S
- d) Reforço do subleito: K_{Ref}

- **Espessura mínima de revestimento asfáltico**

Fixar uma espessura mínima para os revestimentos asfálticos é um dos pontos que o método DNER considerava em aberto na engenharia rodoviária, tanto para proteger a camada de base dos esforços provenientes do tráfego, como para evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão. Com isso, Souza (1981), baseando-se no que já foi observado em campo, recomendou as espessuras mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Espessura Mínima de Revestimento Asfáltico

N	Espessura Mínima de Revestimento Asfáltico
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais asfáltico
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 \leq N < 10^7$	Concreto asfáltico com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico com 12,5 cm de espessura

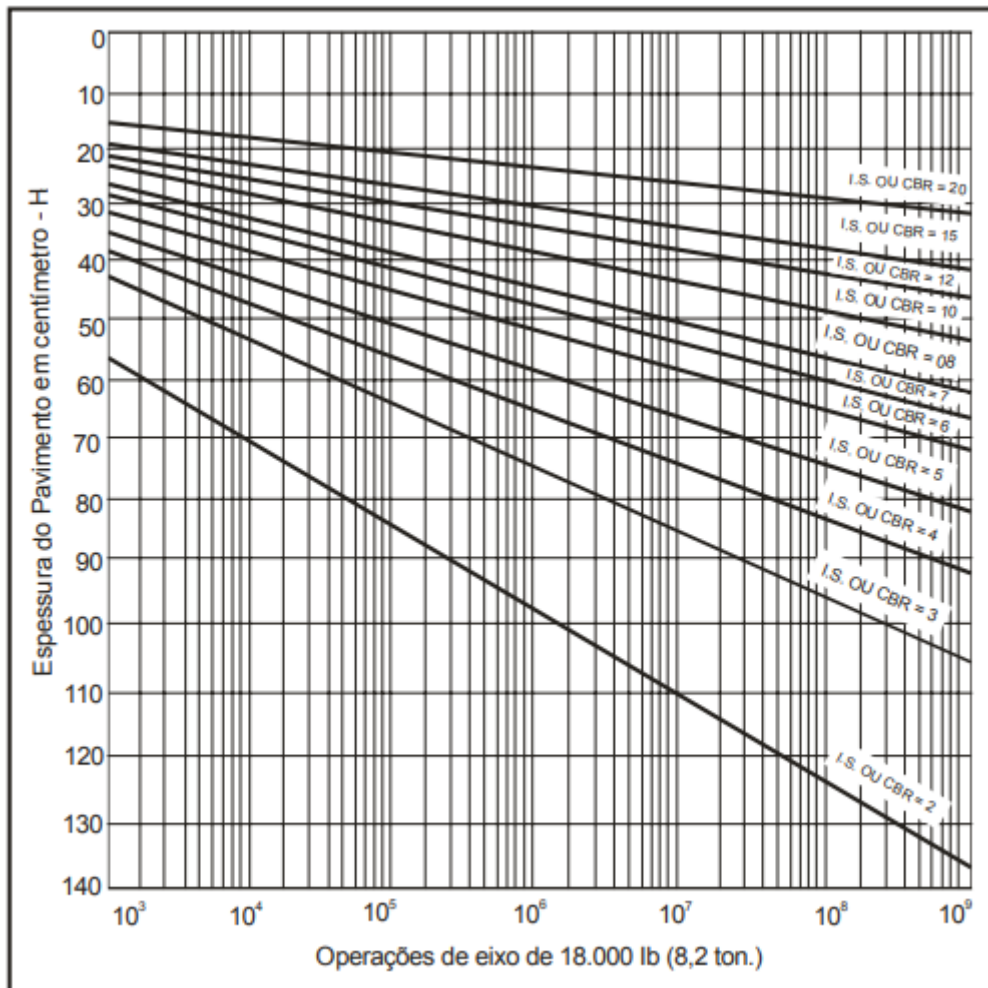
Fonte: Souza (1981)

- **Dimensionamento do pavimento**

Após definir e calcular os parâmetros discutidos nos tópicos anteriores, o dimensionamento de pavimentos prossegue-se com a determinação da espessura total do pavimento e do restante das camadas.

A espessura do pavimento é obtida através de um ábaco (Figura 7) desenvolvido pelo Engº Murillo Souza, onde é possível visualizar o valor da espessura em função do número N e do CBR. Entrando-se em abscissas, com o valor de N, procede-se verticalmente até encontrar a reta representativa do CBR, e seguindo horizontalmente, encontra-se, no eixo das ordenadas, a espessura total do pavimento. A espessura fornecida pela Figura 7 é para materiais de base granular (K=1) (DNIT, 2006).

Figura 7 - Ábaco para Determinação de Espessuras do Pavimento



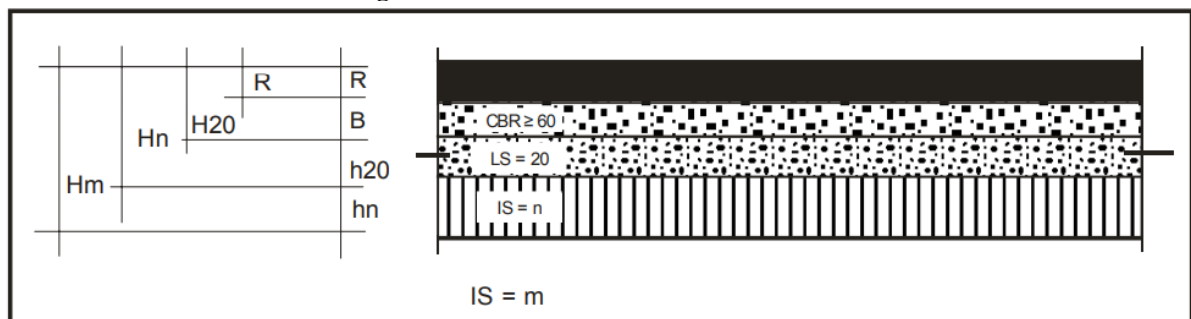
Fonte: Souza (1981)

Para facilitar a determinação da espessura do pavimento, o DNIT (2006) apresenta no Manual de Pavimentação uma equação (Eq. 9), obtida por regressão linear múltipla, para calcular esse termo com base no ábaco apresentado anteriormente (BALBO, 2007).

$$H_i = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (\text{Eq. 9})$$

De acordo com Souza (1981), a estrutura do pavimento pode ser representada conforme mostrado na Figura 8, nela é apresentada a simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento.

Figura 8 - Dimensionamento do Pavimento



Fonte: Souza (1981)

Após definir a espessura total do pavimento (H_m), com a camada base de material granular e a espessura mínima do revestimento, o dimensionamento segue-se com o cálculo das espessuras das demais camadas, considerando-se os materiais disponíveis para elas e seus respectivos coeficientes de equivalência estrutural. Salienta-se que, a espessura construtiva mínima para as camadas granulares é de 15 cm, e as espessuras mínima e máxima de compactação são de 10 e 20 cm, respectivamente (BEZERRA NETO, 2004; SOUZA, 1981).

As espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e do reforço do subleito (h_n) são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq H_{20} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_S \geq H_n \quad (\text{Eq. 11})$$

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_S + h_n \cdot K_{REF} \geq H_m \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

R, B, h_{20} e h_n = espessuras do revestimento, base, sub-base e do reforço do subleito, respectivamente;

K_R, K_B, K_S e K_{REF} = coeficiente de equivalência estrutural do revestimento, base, sub-base e do reforço do subleito, respectivamente;

H_{20} = espessura do pavimento do topo do revestimento até o topo da sub-base;

H_n = espessura do pavimento do topo do revestimento até o revestimento do subleito;

H_m = espessura do pavimento do topo do revestimento até a camada do subleito;

Torna-se explícito que mesmo que o CBR da sub-base seja superior a 20 cm, a espessura do pavimento necessário para protegê-la é determinada como se esse valor fosse 20 e, por esta razão, usam-se sempre os símbolos, H_{20} e h_{20} (DNIT, 2006).

4.2.3 Métodos mecanísticos-empíricos (ME)

Um método de dimensionamento pode ser chamado de mecanístico quando utiliza uma teoria para prever as tensões e deformações decorrentes do tráfego e do clima que atuam na estrutura do pavimento, e procura compatibilizá-las com as tensões resistente dos materiais (MOTTA, 1991).

As dificuldades em diminuir o empirismo nos métodos de dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos ocorrem por ser um processo que abrange o conhecimento de variáveis de difícil previsão e modelagem, sendo elas: características dos materiais que compõem a estrutura do pavimento, o comportamento deles em relação à aplicação das cargas, o próprio carregamento da estrutura e o tipo de resposta das camadas para suportar as cargas conforme todas as variações do clima no período de análise (FRANCO, 2007).

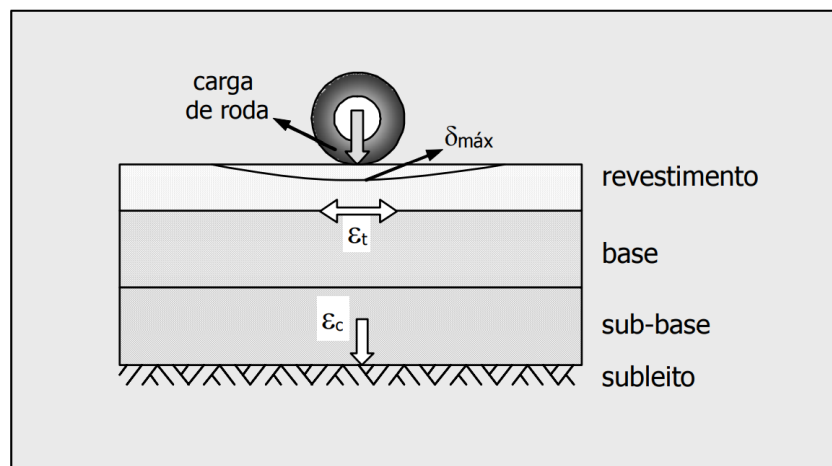
Os danos nas estruturas dos pavimentos podem ocorrer por vários fatores, sendo eles: efeito do clima, volume de tráfego, peso e pressão das rodas do carregamento, variação lateral da passagem dos veículos e qualidade dos materiais utilizados. Em virtude dos métodos empíricos para dimensionamento, por exemplo o do DNER, não considerarem fatores climáticos e a degradação proveniente das deformações elásticas, a principal causa da ruptura é a fadiga. (FRANCO, 2007; MOTTA, 1991)

Motta (1991) explana que as principais causas de deterioração dos pavimentos são o acúmulo de deformações permanentes que ocasionam no afundamento de trilhas de roda e a repetição das deformações elásticas que geram a ruptura por fadiga nas camadas de maior rigidez. Essas duas rupturas podem ser modeladas a partir de técnicas de análise estrutural, porém, ainda segundo Motta (1991), apesar de toda a tecnologia, as técnicas de análise mecânica precisam de calibração com dados empíricos, por se tratar de um fenômeno complexo.

Por isso, houve a necessidade da elaboração de métodos mecânicos-empíricos, onde a parte mecânica utiliza ferramentas para analisar a tensão-deformação, resistência e resiliência conforme o tráfego, clima e os tipos de ruptura. Enquanto o empirismo é para definir em laboratório as constantes, curvas e outros fatores necessários para o dimensionamento (MOTTA, 1991).

A estrutura de um pavimento é composta por camadas que estão submetidas a um carregamento superficial uniformemente distribuído de forma circular (Figura 9), podendo ser dimensionada por meio da Teoria da Elasticidade (FRANCO, 2007).

Figura 9 - Estrutura de um pavimento com tensões, deformações e deslocamentos.



Fonte: Franco (2007)

A teoria da elasticidade é utilizada como instrumento para calcular tensões, deformações e deslocamentos provenientes da reação do pavimento quanto ao tráfego, espessura das camadas, módulos de resiliência e coeficientes de Poisson dos materiais segundo dois comportamentos de tensão-deformação distintos, sendo eles: comportamento elástico linear e elástico não-linear (FRANCO, 2007).

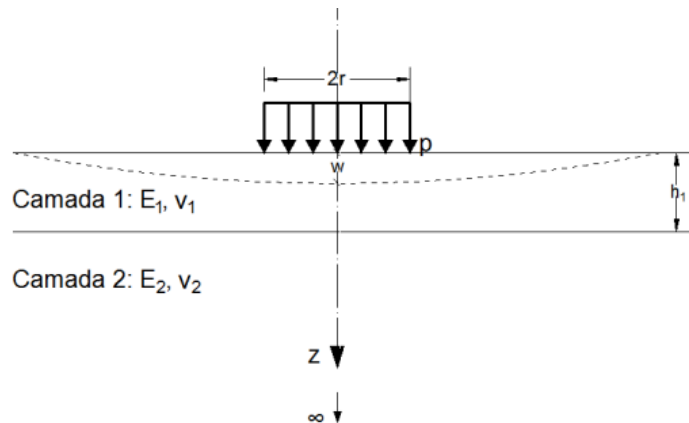
O Módulo de Resiliência dos materiais tem uma variação de acordo com o comportamento elástico. Para o elástico linear, ele não apresenta variação ao longo da espessura da camada, o oposto do que ocorre quando o comportamento é não-linear, pois o Módulo de Resiliência pode variar ao longo da espessura, o que o torna dependente da variação do estado de tensões a qual o material está submetido (MOTTA, 2003 *apud* FERREIRA, 2013).

Em 1885, Boussinesq formalizou a primeira solução de tensões e deformações em espaço elástico semi-infinito quando uma carga pontual atua sobre a superfície (Figura 10). Sua teoria tinha a finalidade do cálculo de tensões e deformações em um solo, como camada homogênea, semi-infinita, linearmente elástica e isotrópica. A partir das equações de Boussinesq, em 1943, Burmister expôs um método para determinar tensões e deformações em duas e três camadas, com o estabelecimento da Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE) (BALBO, 2007; COUTINHO, 2011).

De acordo com Franco (2007), as principais hipóteses adotadas por Burmister foram:

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 não têm peso;
4. as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
5. todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
6. a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
7. na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
8. a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
9. a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
10. as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

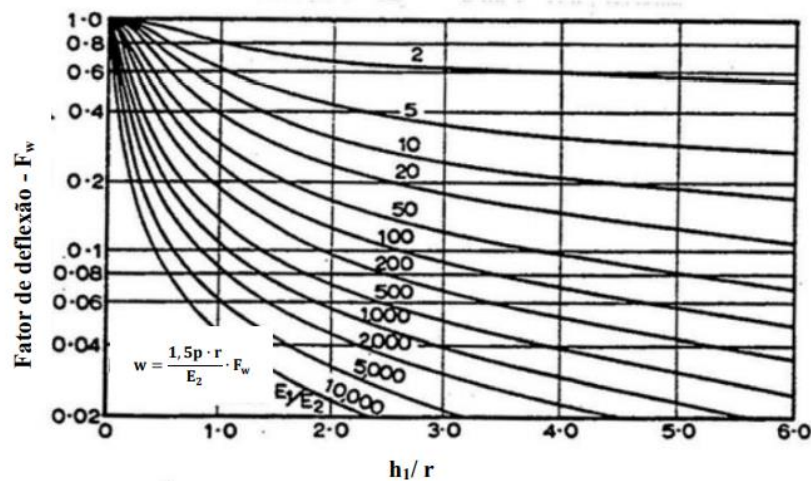
Figura 10 - Carregamento circular em um sistema de duas camadas



Fonte: Silva (2014)

A conclusão apresentada por Burmister mostra que a razão entre os módulos das camadas é um fator importante na deformabilidade da estrutura, por exemplo: no caso de uma estrutura de duas camadas quanto maior a razão entre o módulo da primeira camada e o módulo da segunda camada (E_1/E_2) menor a deflexão (w) no centro da área flexível de carregamento, pois menor é o fator de deflexão (F_w) obtido no ábaco elaborado por Burmister (Figura 11).

Figura 11 - Ábaco para o cálculo da deflexão considerando um sistema de duas camadas



Fonte: Silva (2014)

Grande parte dos métodos de dimensionamento de pavimentos utilizam as teorias de elasticidade linear, apesar da maioria dos materiais, como granulares e solos finos, apresentarem comportamento elástico não-linear. A escolha pela solução da elasticidade linear é devido aos seguintes motivos (MOTTA, 1991; AYRES, 1997; RODRIGUES, 1998 *apud* FRANCO, 2007):

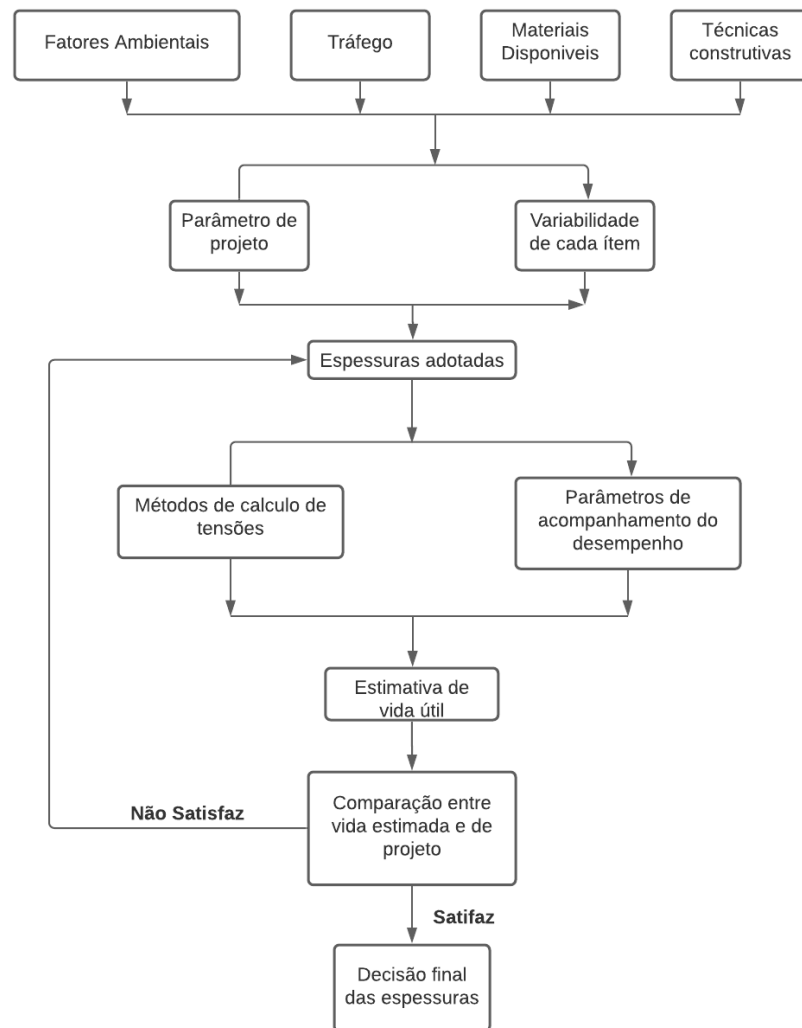
1. é comum admitir um modelo elástico linear para as misturas asfálticas, para uma determinada temperatura;
2. a teoria da elasticidade linear tem sido a base para a maior parte das aplicações práticas, podendo ser utilizada com um grau de confiança razoável, principalmente quando o pavimento possui camadas com maiores espessuras asfálticas ou camadas cimentadas;
3. os parâmetros necessários para a análise são obtidos por meio de equipamentos em laboratórios de solos existentes em alguns locais do Brasil.

A partir dessa teoria, foi possível desenvolver diversos programas computacionais para o cálculo das tensões e deformações em estruturas de camadas elásticas. Os mais conhecidos são: BISAR da Shell; KENLAYER da Universidade de Kentucky; ELSYM5, da Universidade da Califórnia de KOPPERMAN et al. (1986); e o JULEA, de UZAN (1978) (FRANCO, 2007).

O programa JULEA é utilizado como base para diversos métodos como: pelo PAVE, de FRANCO (2000); pelo AYMA, de AYRES (1997); pelo LEDFAA, da FAA, até 2004; pelo Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004); e pelo PCASE, da USACE (FRANCO, 2007).

No Brasil, Motta (1991) apresentou, na sua tese de doutorado, um fluxograma (Figura 12) indicando os passos para seguir na definição de um método de projeto, considerando as novas técnicas de ensaio de materiais de pavimentação, métodos racionais e cálculo de tensão-deformação nas diversas camadas, influências climatológicas, conceitos de serventia e desempenho e parâmetros de tráfego.

Figura 12 - Esquema da proposta de método de dimensionamento



Fonte: Adaptado de Motta (1991)

A análise mecânica é realizada utilizando um programa computacional, usando um modelo elástico linear para o revestimento asfáltico e elástico não-linear para as camadas subjacentes, verificando-se as tensões e deformações e comparando-as com os critérios de aceitação pré-estabelecidos. Nesse caso, os critérios que podem ser adotados são: deflexão máxima admissível na superfície; diferença de tensões no revestimento; tensão vertical admissível no topo do subleito; tensão e deformação de tração na fibra inferior do revestimento (MOTTA, 1991).

Um dado de entrada utilizado nos *softwares* de dimensionamento ME é o módulo de resiliência do material de cada camada, dele que é interpretada a característica elástica do material. Esse módulo pode ser obtido através de ensaios ou programas de retroanálise de bacias deflectométricas (FONSECA, 2013).

4.2.3.1 Modelos de Ruptura

O conceito de ruptura do pavimento flexível é considerado como um fator essencial em todos os métodos de dimensionamento. O pavimento asfáltico possui dois tipos de ruptura: a ruptura estrutural e a ruptura funcional. A ruptura estrutural é o colapso da estrutura do pavimento, ou de um de seus componentes, de maneira que o pavimento se torna incapaz de sustentar qualquer carga imposta em sua superfície. A ruptura funcional é a condição que o pavimento atinge caracterizada pelo desconforto ao rolamento dos veículos, pela diminuição da segurança das operações e pelo aumento do risco de aquaplanagem e defeitos gerados pelo trincamento ou grandes deformações. Esse tipo de ruptura pode ou não vir acompanhada de uma ruptura estrutural (YODER e WITCZAK, 1975 *apud* FRANCO, 2007).

Os dois tipos de ruptura que ocorrem com maior frequência nos pavimentos e que devem ser considerados no dimensionamento são a de trincamento por fadiga e o afundamento de trilha de roda (ATR).

4.2.3.1.1 Análise de Fadiga

A repetição das deformações resilientes, que são ocasionadas pelo movimento dos veículos no pavimento é a responsável pela ruptura por fadiga das camadas de misturas asfálticas e os materiais cimentados (Figura 13). Esse fenômeno ocorre quando há uma sollicitação maior na base do revestimento asfáltico, resultado de uma maior sollicitação do esforço de tração, que ocasiona o aparecimento de fissuras no material, evoluindo posteriormente para trincas e que pode levar à falha total do pavimento (COUTINHO, 2011; MOTTA, 1991).

Figura 13 - Painela causada por trincas por fadiga



Fonte: Autora (2021)

O termo “Deformação Resiliente” foi proposto por Hveem na década de 40, quando observou que grande parte dos defeitos dos revestimentos tinham origem na fadiga, ou seja, na repetição das pequenas deformações elásticas. Ele denominou deformação resiliente a deformação elástica dos pavimentos sujeitos a cargas cíclicas, como forma de distingui-la das deformações que normalmente ocorrem em outras estruturas e que não são repetidas tão aleatoriamente quanto a intensidade, duração e frequência em relação ao tráfego real (MOTTA, 1991).

Alguns ensaios são realizados com o intuito de estabelecer a relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos de carga que ocorrem até o pavimento atingir a ruptura. Os procedimentos mais comuns são: ensaios de flexão repetida, tração direta ou ensaios diametrais realizados a determinados níveis de tensão ou extensão (FONTES, 2009). Existem dois critérios quanto a aplicação do carregamento que podem ser adotados para realizar os ensaios. Eles podem ser realizados a tensão controlada (TC) ou por deformação controlada (DC) (ROSSATO, 2015).

Nos ensaios a tensão controlada, as amostras recebem solicitações de carregamentos de mesma intensidade, de maneira que ocorre um aumento das deformações até a ruptura completa da amostra ensaiada. Essa análise é caracterizada pela aplicação de uma carga constante e conhecida, que é executada em ciclos repetidos, simulando as condições em campo onde a carga das rodas dos veículos atua sobre os pavimentos de maneira repetitiva (PINTO 1991, *apud* ROSSATO, 2015).

O desempenho à fadiga de misturas asfálticas também pode ser determinado por meio de ensaios à deformação controlada. Nesse ensaio, a deformação é mantida constante enquanto a tensão inicial no corpo-de-prova diminui até o fim do ensaio, garantindo condição semelhante à de deformação pré-estabelecida (ROSSATO, 2015).

A quantificação da durabilidade com relação da fadiga de uma mistura asfáltica pode ser denominada como “Vida de fadiga”. De acordo com a norma DNIT ME 183/2018, o termo vida de fadiga pode ser definido como:

Volume de tráfego expresso por número equivalente do eixo padrão (N) que ele pode suportar antes que o dano observado, em termos de quantidade de trincas, atinja uma determinada porcentagem de área trincada admissível para cada tipo de via.

A vida de fadiga é expressada em relação as tensões ou a deformação resiliente inicial (ϵ_i). A deformação resiliente pode ser obtida por meio do módulo de resiliência da mistura asfáltica ou medida nas primeiras aplicações de carga para cada nível de tensão aplicado no ensaio. Nos ensaios de tensão e deformação controlada, os critérios de ruptura apresentados são diferentes, como apresentado anteriormente. Porém, ambas as formulações são muito semelhantes, como mostrado a seguir (PITANGUI, 2020):

- Ensaio a tensão controlada:

$$N_f = K_1 \cdot \left(\frac{1}{\sigma_i}\right)^{n_1} \quad (\text{Eq. 13})$$

- Ensaio a deformação controlada:

$$N_f = K_2 \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{n_2} \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

N_f = vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga para a redução de 50% da rigidez da mistura ou ruptura total do corpo de prova;

σ_i = tensão de tração aplicada;

ϵ_i = deformação de tração inicial;

K_1, K_2, n_1, n_2 = parâmetros determinados experimentalmente.

4.2.3.1.2 Deformação Permanente - ATR

O afundamento de trilha de roda é um resultado da deformação permanente (Figura 14). Este ocorre devido a passagem repetida das cargas dos veículos, que submete o pavimento ao carregamento de tensões elevadas. Esse defeito é caracterizado pelo afundamento longitudinal do pavimento asfáltico, cujo é uma deformação não recuperável e que ocasiona problemas de desempenho da estrutura e causa desconforto e insegurança aos usuários (COUTINHO, 2011).

Figura 14 - Afundamento de trilha de roda



Fonte: Autora (2021)

A verificação da deformação permanente em pavimentos ocorre de maneira complexa, pois demanda um tempo elevado e envolve a coleta de grande quantidade de variáveis (Franco, 2000). A deformação permanente ainda é avaliada indiretamente por meio das tensões verticais e deformações resilientes, obtidas mediante a aplicação de cargas que ocorrem no topo do subleito, considerando que a deformação das camadas realizadas acima do subleito é insignificante quando comparada à deformação do próprio subleito. Para avaliação dessa deformação, são utilizados ensaios de compressão uniaxial, compressão triaxial e ensaios de simuladores de tráfego (FRANCO, 2007; COUTINHO 2011).

De acordo com Franco (2007), existem diversos modelos para previsão de deformação permanente. Um dos mais utilizados considera o limite de deformação de afundamento de trilha de roda por meio da adoção de modelos de deterioração vertical no topo do subleito ou no conjunto das camadas da estrutura do pavimento asfáltico e pode ser representado pelas equações a seguir.

$$\varepsilon_v = a \cdot N^b \quad (\text{Eq. 15})$$

Ou

$$n = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{k_2} \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde:

ε_v = deformação vertical limite no topo do subleito;

a, b = coeficientes experimentais obtidos em ensaios de laboratório;

k_1 , k_2 = coeficientes experimentais obtidos em ensaios de laboratório;

n = número admissível de aplicações de carga no laboratório.

4.2.4 Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa)

O estudo de métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis vem sendo realizado há décadas no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Motta (1991) desenvolveu sua tese de doutorado com uma sugestão dos passos a serem seguidos para o desenvolvimento de um projeto. Em 2007, Franco (2007) desenvolveu em sua tese de doutorado um método mecanístico-empírico de dimensionamento dos pavimentos flexíveis, utilizando análise elástico linear e não-linear. Os danos aos pavimentos foram estimados através de modelos de previsão de fadiga, deformação permanente e deformação máxima admissível no topo do subleito. Para fins de calibração, validação e utilização, o método foi consolidado em um software computacional denominado SisPav, que recebeu uma atualização em 2013, e ficou denominado SisPavBR.

Através do Termo de Execução Descentralizada celebrado entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e a COPPE, entre os anos de 2015 e 2018, o método de dimensionamento proposto por Franco (2007) foi denominado Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa)..

O MeDiNa é um programa que realiza a verificação e o dimensionamento de pavimentos através de uma rotina de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), calculando tensões e deformações em estruturas de pavimentos com até oito camadas sob carregamento de rodas do tipo eixo padrão rodoviário. O software aplica técnicas para modelos de fadiga e deformação permanente e é uma atualização do método do DNER que vem sendo utilizado no país (DNIT, 2020a).

A análise de uma estrutura de pavimento e o seu dimensionamento necessita do máximo de informações para que os resultados obtidos sejam confiáveis. São necessárias informações sólidas sobre o subleito, como o seu módulo de resiliência e curva de deformação permanente. Além do subleito, todos os materiais naturais disponíveis para utilização em bases, sub-bases e

reforço do subleito, provenientes de jazidas, pedreiras ou areais, também devem ser muito bem conhecidos e suas propriedades de módulo e de deformação permanente devem ser obtidas com ensaios laboratoriais como o triaxial de carga repetida. Além disso, outra informação que é chave para o correto funcionamento do software MeDiNa é a definição do Número Equivalente de Eixos, o número N. Os modelos utilizados no programa mostram-se sensíveis a pequenas variações do Número N, e, portanto, uma estimativa apurada é de grande importância para o sucesso do projeto (DNIT, 2020a).

De acordo com o seu manual de utilização, o software apresenta algumas hipóteses que são fundamentais e que se baseiam nas mesmas consideradas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, sendo elas:

1. Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por iterações elásticas lineares);
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 superior 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.

O *software* pode ser utilizado em dois modos para tratar os dados. Os dois métodos disponíveis atualmente são:

- Pavimento Novo (Nível 1): Modo para elaboração de projetos de pavimentos novos no nível de projeto 1, onde as propriedades das camadas são obtidas por ensaios de laboratório;
- Projeto de Reforço: Modo para elaboração de projeto de reforço, onde as propriedades das camadas existentes são obtidas por meio de retroanálise de bacias deflectométricas.

O modo reforço necessita que o projetista forneça como entrada os valores retroanalizados de bacias de campo obtidas com equipamento tipo FWD, pode-se importar as bacias retroanalizadas do *BackMeDiNa* na opção Importar Retroanálise ou preencher os dados manualmente. Após a importação, o projetista deverá concluir o preenchimento dos dados da camada asfáltica existente, com os dados de percentual de área trincada, IRI, e idade do pavimento, para permitir o programa rodar as análises ou o dimensionamento (SOUZA JÚNIOR, 2018). Esse modo não será analisado no presente trabalho, apenas o de Projeto Novo.

O manual apresenta que o eixo utilizado nas análises e no dimensionamento do pavimento é o eixo padrão rodoviário (Figura 15), isso foi definido em função da calibração dos modelos de fadiga, que se baseou na comparação da evolução da área trincada com o número estimado de passagens do eixo padrão. Se o projetista já tiver o N da via em estudo, ele pode entrar com o valor direto no campo correspondente, caso contrário, o N pode ser obtido partir do volume médio diário (VMD) em conjunto com o fator de veículo (FV). A partir destes dois valores, o software MeDiNa calcula o número anual equivalente de eixos (N anual) automaticamente.

Figura 15 - Eixo padrão rodoviário assumido no software



Fonte: DNIT (2020)

Após a análise ou dimensionamento da estrutura, a aba resultados fica disponível apresentando os relatórios para consulta. Segundo o manual (DNIT, 2020a), existem 3 tipos de relatórios que são fornecidos e podem ser explorados pelo projetista:

1. **Evolução Mensal dos Danos:** a tabela de evolução mensal dos danos apresenta os resultados do comportamento da área trincada, da deformação permanente total e do Módulo Sigmoidal quando houver camadas cimentadas na estrutura;
2. **Resumo da Deformação Permanente:** é um resumo da deformação permanente na estrutura ao fim do período de análise, com a contribuição de cada camada na deformação permanente total;

3. Relatório Completo da Análise: apresenta todas as informações utilizadas no dimensionamento ou na análise da estrutura.

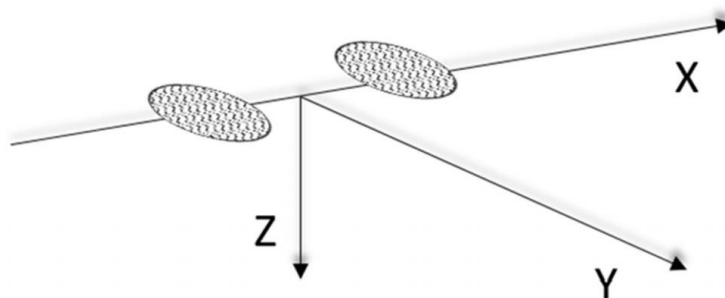
Existe a possibilidade de o programa não conseguir dimensionar a estrutura, então ele emite alguns alertas para o projetista indicando as situações:

- A espessura atingiu o máximo permitido para a análise (15cm para as camadas asfálticas e 40cm para as demais);
- A camada apresentou deformação permanente acima do limite de 5% da sua espessura;
- O subleito apresentou deformação permanente acima do limite de 5mm;
- A camada abaixo da camada estabilizada possui uma deflexão superior a 70 (0,01mm).

4.2.4.1 Sistema de Coordenadas e Unidades

Para o dimensionamento de pavimentos por meio do método MeDiNa, é necessário um ajuste das coordenadas para o eixo padrão rodoviário, com o objetivo de possibilitar a avaliação dos efeitos sobre os variados pontos no interior da estrutura do pavimento de maneira coerente. Observa-se na Figura 16, que o eixo principal do dimensionamento coincide com o eixo de simetria das áreas carregadas.

Figura 16 – Eixo de coordenadas MeDiNa



Fonte: DNIT (2020)

As unidades de grandezas físicas utilizadas pelo programa são apresentadas no Quadro 3, o projetista deve-se atentar a elas para o uso correto do *software*.

Quadro 3 – Unidades das grandezas físicas - MeDiNa

GRANDEZA	UNIDADE
Espessuras e distâncias	cm
Raio do carregamento	cm
Deslocamentos	μm
Deflexões (viga benkelman ou FWD)	0,01mm
Deformações específicas	m/m
Área de contato	cm ²
Pressão de inflação e tensões	MPa
Carga de eixo ou de roda	ton
Massa específica aparente seca	g/cm ³

Fonte: DNIT (2020)

4.2.4.2 Calibração e Validação

Com o intuito de compatibilizar o comportamento dos materiais em campo e no laboratório, Fritzen (2016) propôs uma metodologia de previsão do dano de fadiga em estrutura de pavimentos asfálticos, a qual foi atualizada para desenvolvimento do *software* MeDiNa.

A função de transferência apresenta a evolução da área trincada do pavimento por meio de uma curva sigmoideal com 4 seções. Para a utilização da função do MeDiNa, foi realizado um reajuste da calibração, onde foi identificada e definida matematicamente a melhor curva sigmoideal que representasse o comportamento da evolução da área trincada dos segmentos monitorados. Com o objetivo de minimizar o erro entre a evolução da área trincada e a curva sigmoideal padrão, foram multiplicados aleatoriamente alguns fatores de deslocamento aos valores de número N que possuíam uma leitura de área trincada, conforme observado na Eq. 17 (DNIT, 2020a).

$$N' = (N \cdot fS) \cdot 10^{-10} \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde:

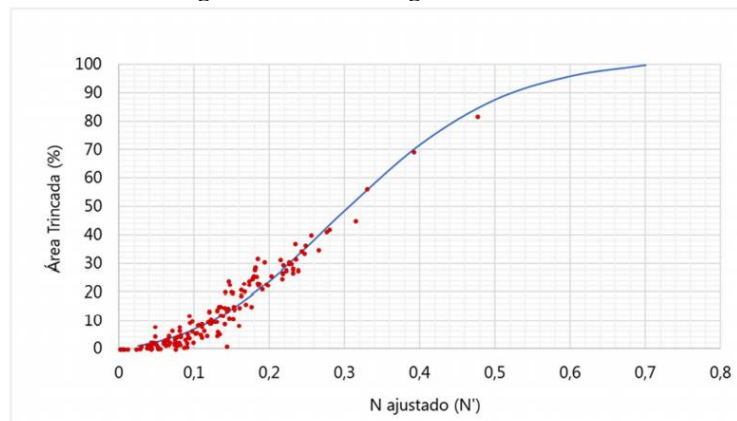
N' = número N ajustado;

N = número de repetições do eixo padrão quando foi realizada a medição de área trincada;

fS = fator de deslocamento atribuído.

Com isso, após a aplicação de todos os fatores, as seções estudadas por Fritzen (2016) se ajustaram à curva sigmoide, conforme resultado observado na Figura 17.

Figura 17 – Curva sigmoide MeDiNa



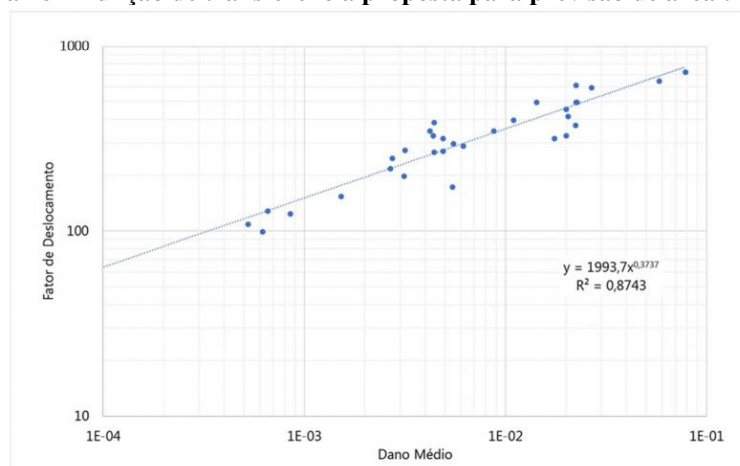
Fonte: DNIT (2020)

Após o ajuste e definição da curva, notou-se a necessidade de correlacionar os dados de área trincada com alguma informação estrutural do pavimento. Verificou-se que com 20 pontos de calibração era possível estabelecer uma boa correlação com os fatores de deslocamento, considerando 10 pontos da superfície do pavimento e 10 pontos da face inferior da camada asfáltica. Para cada período calcula-se o dano médio distribuído nesses 20 pontos.

Após o cálculo do dano médio, foi possível a atualização da Função de Transferência, a qual transforma esse dano em uma previsão de área trincada. A expressão da função deslocamento e o resultado da correlação é apresentado na Eq. 18 e Figura 18, respectivamente, onde fS é o fator de deslocamento, $C1$ e $C2$ foram as duas constantes definidas no processo de calibração, cujo melhor ajuste encontrado foi de 1993,7 e 0,3737 respectivamente.

$$fS = C1 \cdot (D_{\text{médio}})^{C2} \quad (\text{Eq. 18})$$

Figura 18 – Função de transferência proposta para previsão de área trincada



Fonte: DNIT (2020)

4.2.4.3 Critério e Aderência

A relação dos critérios de aderência entre as camadas do pavimento é um estudo essencial. Estudos mostram que as condições de aderência entre as camadas influenciam diretamente nas deformações de tração do revestimento asfáltico e com a formação de trincas por fadiga desse material (TORQUATO e SILVA *et al.* 2019).

O MeDiNa não permite que o projetista insira valores numéricos para esse parâmetro e define apenas duas condições: aderido e não aderido. O Quadro 4, apresentado no manual do *software* (DNIT, 2020), mostra, dependendo de qual camada está sobre a outra, a condição de aderência especificada.

Quadro 4 – Condição de aderência das camadas

CAMADA	CONDIÇÃO
Camada asfáltica sobre outra camada asfáltica	ADERIDO
Camada asfáltica sobre outra camada cimentada	NÃO ADERIDO
Camada asfáltica sobre camada anti-reflexão de trincas	ADERIDO
Camada asfáltica sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Tratamento superficial sobre camadas asfálticas	ADERIDO
Tratamento superficial sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Camada estabilizada sobre outra camada estabilizada	NÃO ADERIDO
Camada estabilizada sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Camada anti-reflexão de trincas sobre camadas estabilizadas	NÃO ADERIDO
Camada de solos ou granulares sobre camadas asfálticas, cimentadas, de solos ou granulares	NÃO ADERIDO

Fonte: DNIT (2020)

4.2.4.4 Critério de Fadiga

No MeDiNa o cálculo da fadiga de misturas asfálticas é realizado utilizando o estado de tensões calculado em 10 pontos na superfície da camada, espaçados de 3,65 cm, e outros dez na fibra inferior da última camada asfáltica da estrutura do pavimento. Logo, é calculada uma média dano de fadiga em cada um dos 20 pontos, com essa média é possível calcular a área trincada com base na função de transferência citada no item 4.2.4.2.

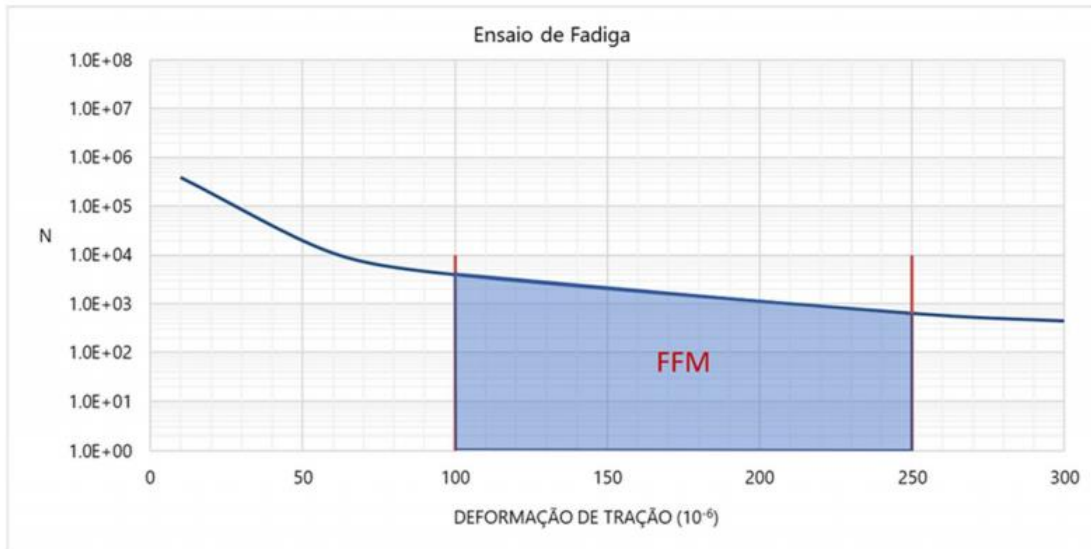
O manual do programa indica que a curva de fadiga deve ser obtida a partir de ensaios de carregamento repetido, à tensão constante, utilizando o ensaio de compressão diametral de tração indireta. Para o cálculo da fadiga do material no *software*, o projetista deve inserir os coeficientes de regressão da curva de fadiga (k_1 e k_2) que são provenientes da relação entre o número de ciclos (N_{fad}) e a deformação específica resiliente de tração (ϵ_t), Eq. 19. Os fatores críticos do dimensionamento estão relacionados à qualidade dos materiais asfálticos.

$$N_{fad} = k_1 \cdot \epsilon_t^{k_2} \quad (\text{Eq. 19})$$

Devido à grande dificuldade de realizar um projeto com dados completos da mistura que será utilizada em campo, o MeDiNa apresenta as Classes de Fadiga. Nessas classes, os tipos de misturas asfálticas são selecionados baseados nos valores de módulo de resiliência e de desempenho à fadiga.

Cada mistura asfáltica possui um valor de Fator de Fadiga da Mistura (FFM), que quando é confrontado com o módulo de resiliência, define a classe do material. O FFM foi definido como a área da curva de fadiga da mistura entre as deformações de tração de 100μ e de 250μ . Esse fator é calculado automaticamente pelo *software* e sua identificação é dada por meio da Figura 19.

Figura 19 - Gráfico de definição fator de fadiga na mistura adotado pelo MeDiNa



Fonte: DNIT (2020a)

Assim como o FFM, a Classe de Fadiga das Misturas Asfálticas também é definida automaticamente pelo MeDiNa e esses dois parâmetros devem ser avaliados em conjunto, pois um interfere no outro e juntos definem a performance do pavimento (DNIT, 2020a).

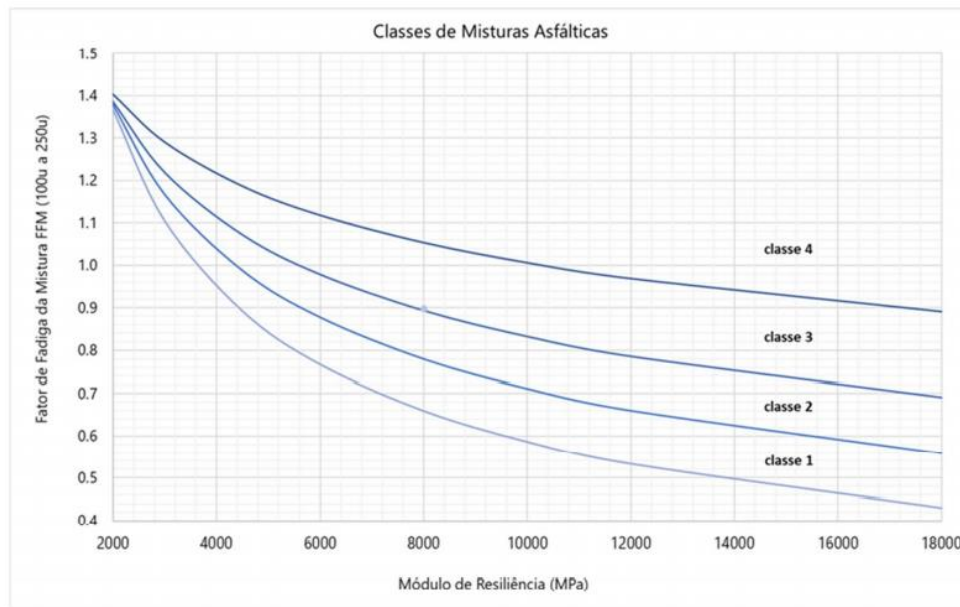
O gráfico das classes foi elaborado considerando algumas misturas asfálticas ensaiadas no laboratório da COPPE e em outras publicações de teses. Por meio do MeDiNa, simulou-se uma estrutura com 10 cm de espessura da camada asfáltica e 20 cm de base granular, com isso foram obtidos a partir de simulações os valores de tráfego que a estrutura suportaria até atingir uma área trincada igual a 30% com 85% de confiabilidade. As classes são apresentadas na Tabela 7 e no gráfico da Figura 20.

Tabela 7 – Classes de fadiga

Classe	Repetições de eixo padrão (RP)
1	$4,5 \times 10^6 \leq RP < 6,0 \times 10^6$
2	$6,0 \times 10^6 \leq RP < 7,5 \times 10^6$
3	$7,5 \times 10^6 \leq RP < 1,0 \times 10^7$
4	$RP \geq 1,0 \times 10^7$

Fonte: DNIT (2020a)

Figura 20 – Classes de Misturas Asfálticas



Fonte: DNIT (2020a)

Os materiais granulares, solos finos, siltosos e argilosos e os subleitos não são avaliados no programa MeDiNa quanto ao dano por fadiga nem quanto à tensão no topo do subleito.

4.2.4.5 Deformação Permanente

Com relação a deformação permanente, o MeDiNa avalia os materiais com base no estudo proposto por Guimarães (2009), que por meio de ensaios de materiais submetidos à ação de cargas repetidas, conforme já citado anteriormente, conseguiu definir modelos de previsão com elevados coeficientes de correlação baseados em uma equação com quatro constantes:

$$\varepsilon_p^{esp} = \psi_1 \cdot (\sigma_3)^{\psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\psi_3} \cdot (N)^{\psi_4} \quad (\text{Eq. 20})$$

Onde:

ε_p^{esp} : deformação permanente específica (%);

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$: parâmetros de regressão;

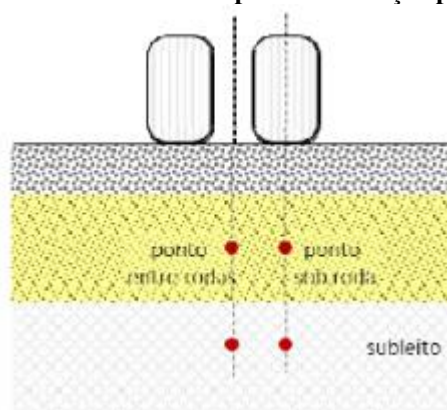
σ_3 : tensão confinante (kgf/cm²);

σ_d : tensão desvio (kgf/cm²);

N: número de ciclos de aplicação de carga.

Para calcular a deformação permanente, o *software* utiliza o estado de tensões calculado em quatro pontos específicos sob a roda e entre as rodas (Figura 21). Logo, para a obtenção da deformação da camada, o ponto de deformação sob a roda é multiplicado pela espessura da respectiva camada.

Figura 21 – Pontos de cálculo para deformação permanente



Fonte: DNIT (2020)

4.2.4.6 Critérios de parada

De acordo com o tipo de via em análise no *software*, o MeDiNa apresenta alguns critérios de parada que são exibidos após o cálculo do dano acumulado de fadiga no revestimento asfáltico e de deformação permanente da base, sub-base e do subleito. Esses critérios são importantes para guiar e orientar os projetistas sobre a estrutura que está sendo dimensionada, de maneira que possam analisar, para o período de projeto e para as características e espessuras das camadas dimensionadas, se foi atingido ou não o limite de porcentagem de área trincada e o limite de deformação permanente (Tabela 8).

Tabela 8 - Critérios de parada e confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa

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

Fonte: DNIT (2020a).

4.2.4.7 Materiais

- **Materiais Asfálticos**

No MeDiNa existem três categorias de materiais asfálticos: as camadas asfálticas tradicionais, as camadas asfálticas com asfalto modificado por polímero e as camadas asfálticas misturadas com borracha. O módulo de resiliência das camadas asfálticas é do tipo elástico linear e deve ser obtido por meio de ensaio por compressão direta. As características da mistura como faixa granulométrica, teor de CAP, volume de vazios, abrasão Los Angeles, são lançadas pelo projetista de forma que elas possam ser controladas ao longo da sua execução no campo. Além disso, para quantificação dos danos de área trincada, tais materiais são avaliados pelo modelo de curva de fadiga (DNIT, 2020a).

- **Camadas antirreflexão de trincas**

No MeDiNa existem dois tipos de materiais para a camada de antirreflexão de trincas: o tratamento superficial duplo (TSD) ou a camada de SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer). Porém, essas camadas só ficam disponíveis para utilização quando o projeto prevê a utilização de bases estabilizadas com cimento (BGTC). Além disso, essas não são avaliadas quanto aos critérios de fadiga, nem por critérios de deformação permanente (DNIT, 2020a).

- **Materiais estabilizados**

O programa considera que os materiais estabilizados possuem propriedades elásticas variáveis ao longo da vida de serviço. Por isso adota um módulo de resiliência com comportamento sigmoide, pois este decai a cada mês. Esses tipos de materiais são subdivididos em três categorias principais: Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), Concreto Compactado a Rolo (CCR) e o Solo Cimento. Para as análises, o MeDiNa considera apenas os critérios de fadiga, pois entende que, quando bem executadas, estas camadas não contribuem de forma efetiva para a trilha de roda total da estrutura do pavimento. Assim, cada uma das três categorias citadas possui uma curva de fadiga associada (DNIT, 2020a).

- **Materiais Granulares: Solos finos, Siltosos e Argilosos.**

No caso dos materiais granulares, solos finos, siltosos ou argilosos, o principal parâmetro utilizado pelo MeDiNa para representá-los é o módulo de resiliência. Esses materiais são utilizados basicamente em camadas granulares, os quais são avaliados apenas quanto ao

dano por deformação permanente. Os modelos considerados pelo MeDiNa são indicados no Quadro 5 (DNIT, 2020a).

Quadro 5 – Materiais granulares MeDiNa

Item	Material	Classificação	$\varepsilon_p^{esp} (\%) = \psi_1(\sigma_3)^{\psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\psi_3} \cdot (N)^{\psi_4}$				R ²
			ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	
1	Laterita Acre	Pedregulho	0,105	0,839	-0,014	0,041	0,939
2	Brita Graduada Chapecó	Pedregulho	0,079	-0,598	1,243	0,081	0,951
3	Cascalho Corumbaiba	Pedregulho	0,180	-0,212	0,840	0,443	0,898
4	Laterita de Porto Velho	Pedregulho	0,180	0,470	0,336	0,047	0,809
5	Argila de Ribeirão Preto	LG ⁷	0,206	-0,24	1,34	0,038	0,986
6	Areia Argilosa do ES	LG ⁷	0,643	0,093	1,579	0,055	0,909
7	Solo Papucaia	NS ⁷ /NA ⁷	0,244	0,419	1,309	0,069	0,946
8	Areia Fina de Campo Azul/MG	NA	0,050	-1,579	1,875	0,064	0,868
9	Tabatinga Acre	NG ⁷	Não recomendado				

Fonte: Guimarães (2009)

- **Subleito**

Por fim, tem-se o material do subleito. Esses materiais são tratados de forma similar aos solos granulares, finos, siltosos e argilosos, ou seja, também são representados principalmente por seu módulo de resiliência e avaliados por meio de modelos de deformação permanente (DNIT, 2020a).

4.2.5 Efeito da sobrecarga nos pavimentos

A carga proveniente do tráfego é um dos principais carregamentos considerados em qualquer método de dimensionamento de pavimentos. O excesso de peso pode provocar o surgimento de defeitos precocemente, visto que para cada tipo de veículo existe um limite de peso bruto máximo no momento do dimensionamento. Embora o pavimento tenha como função principal suportar grandes cargas e qualquer ação externa, ele não é dimensionado para absorver o impacto gerado pela sobrecarga dos veículos (TIEFENSEE *et. al*, 2017).

O Código de Trânsito Brasileiro (CTB), Lei nº 9.503, de 1997, estabelece que (CTB, 1997):

Art. 99 Somente poderá transitar pelas vias terrestres o veículo cujo peso e dimensões atenderem aos limites estabelecidos pelo CONTRAN.

§ 1º O excesso de peso será aferido por equipamento de pesagem ou pela verificação de documento fiscal, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

§ 2º Será tolerado um percentual sobre os limites de peso bruto total e peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias, quando aferido por equipamento, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

§ 3º Os equipamentos fixos ou móveis utilizados na pesagem de veículos serão aferidos de acordo com a metodologia e na periodicidade estabelecidas pelo CONTRAN, ouvido o órgão ou entidade de metrologia legal.

Art. 100 Nenhum veículo ou combinação de veículos poderá transitar com lotação de passageiros, com peso bruto total, ou com peso bruto total combinado com peso por eixo, superior ao fixado pelo fabricante, nem ultrapassar a capacidade máxima de tração da unidade tratora.

Observa-se na Figura 22 os principais tipos de eixo e os pesos máximos permitidos por eixo previsto pela legislação brasileira.

Figura 22 – Tipos de eixos e pesos máximos permitidos

Tipo de Eixo	Configuração	Peso máximo permitido (t)
Eixo Simples de Roda Simples (ESRS)		6,0 ou capacidade declarada pelo fabricante
Eixo Simples de Roda Dupla (ESRD)		10,0
Eixo Tandem Duplo (ETD)		17,0
Eixo Tandem Triplo (ETT)		25,5

Fonte: CNT (2017)

Em maio de 2021 foi publicada uma medida provisória nº 1050, alterando a Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997 - Código de Trânsito Brasileiro. A modificação foi referente ao aumento para 12,5% sobre o limite de peso por eixo.

Art. 6º Na fiscalização de peso dos veículos por balança rodoviária serão admitidas as seguintes tolerâncias:

I - 5% (cinco por cento) sobre os limites de pesos regulamentares para o peso bruto total (PBT) e peso bruto total combinado (PBTC); e

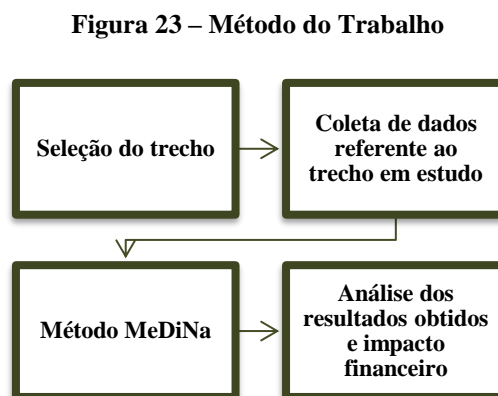
II - doze inteiros e cinco décimos por cento sobre os limites de peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias públicas.

Parágrafo único. No carregamento dos veículos, a tolerância máxima prevista neste artigo não pode ser incorporada aos limites de peso previstos em regulamentação do CONTRAN.

Considerando que o máximo legal é, como o próprio nome já diz, a carga máxima permitida pela lei, esse valor também é o máximo que pode ser utilizado pelo projetista no momento de dimensionamento do pavimento. Logo, a estrutura do pavimento tem sua vida útil reduzida devido ao dano, que não é considerado em projeto, causado pela sobrecarga.

5. MÉTODO

Para realizar a análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos, o método do trabalho será ordenado de acordo com o fluxograma a seguir (Figura 23):



Fonte: Autora (2021)

5.1 Seleção do Trecho para estudo

Esta etapa consiste na seleção do trecho pertencente as rodovias do estado de Alagoas que será analisado no trabalho. O método que será utilizado no *software* MeDiNa é o de *Projeto*

Novo, portanto, os trechos para análise devem ser retirados de projetos de implantação e pavimentação das rodovias, deixando de lado aqueles que são de restauração das mesmas.

Para a escolha do trecho, alguns critérios foram estabelecidos, sendo eles:

- O projeto de pavimentação deve ser de um pavimento novo;
- O pavimento deve ser do tipo flexível;
- No projeto deve ter uma análise mecânica dos materiais das camadas e do subleito do pavimento, para que seja possível coletar dados necessários para uso no *software* MeDiNa.

Estabelecidos os critérios, obtidos a partir do banco de dados do DNIT, propõe-se o estudo no trecho da BR-101/AL: km 247,33 - km 248,61. O trecho escolhido refere-se ao encabeçamento sul da Ponte sobre o Rio São Francisco e está localizado entre o entroncamento da AL-210 em Arapiraca e a divisa de Alagoas e Sergipe (Figura 24). O projeto desse trecho trata da duplicação da via existente e tem como objetivo atender as demandas do crescente tráfego ao longo da rodovia. Além disso, a duplicação da via visa melhorar o escoamento da produção agropecuária no Baixo São Francisco e aumentar o fluxo de pessoas entre os estados de Alagoas e Sergipe.



Fonte: DNIT (2020)

O trecho da rodovia em análise possui as seguintes características apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características do trecho em estudo

Classe da Rodovia:	I-A – Pista dupla – Via Expressa/Sistema Arterial Principal
Segmento:	km 247,33 - km 248,61
Extensão:	1,28 km
Tempo de Projeto:	10 anos
Ano de abertura:	2019

Fonte: DNIT (2020b)

O dimensionamento do pavimento flexível foi realizado para um período de projeto de 10 anos, com a abertura da rodovia ao tráfego prevista para o ano de 2019. Para a elaboração do projeto de pavimentação, foram necessários estudos de tráfego e geotécnicos, com o objetivo de conhecer a região e as propriedades e características dos materiais.

A estrutura do pavimento foi dimensionada utilizando o Método do DNER, porém, devido ao elevado tráfego na região, julgou-se necessário avaliar o dimensionamento mecanisticamente. Nesse caso, utilizaram o programa de cálculo analítico denominado *Everstress Pavement Analysis Programs*, desenvolvido pelo *Washington State Department of Transportation – WSDOT*, nos EUA.

5.2 Coleta de dados referente ao projeto em estudo

O projeto foi elaborado a partir dos elementos levantados pelos estudos geotécnicos elaborados por uma empresa contratada pelo DNIT, contemplando basicamente as seguintes atividades:

- Estudo de tráfego – VDM e Número N;
- Estudo do subleito e cortes, que possibilitou a definição do ISC de projeto;
- Pesquisa, identificação e estudos de ocorrências de materiais (areais, empréstimos, jazidas e pedreiras) para emprego nas camadas do pavimento a ser implantado.

5.2.1 Estudo de Tráfego

Para o estudo de tráfego deste empreendimento, foram utilizados dados de contagens de tráfego realizadas em 2008 para a Elaboração de Estudos de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental – EVETEA. Os dados de tráfego obtidos foram atualizados com o fator de

crescimento anual de 3%, considerando o ano de abertura da via em 2019 e um período de projeto de 10 anos.

Os volumes diários médios de tráfego (VDM) para o segmento em estudo foram obtidos através de contagens volumétricas e classificatórias com contagens medidas por eixos. O resultado da contagem volumétrica e classificatória já corrigida para a sazonalidade no ano de estudo é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Contagem volumétrica por tipo de veículo

Tipo	VDM (corrigido)
2CB	75,00
3CB	105,00
4CB	1,00
2C	323,00
3C	897,00
2S1	5,00
2S2	117,00
2S3	747,00
3S2	14,00
3S3	355,00
3S2S2	324,00
3S2C4	447,00
2C2	7,00
3C2	2,00
3C3	2,00

Fonte: DNIT (2020b)

5.2.1.1 Determinação do número N

O projeto foi elaborado com base nos estudos de tráfego que possibilitaram a determinação do parâmetro de tráfego a ser utilizado nos métodos de dimensionamento do pavimento novo a serem empregados, representado pelo Número "N" de repetições do eixo simples padrão de rodas duplas de 8,2 t, estimado com os fatores de equivalência do USACE.

Aplicando os resultados obtidos na expressão para determinação do número N de projeto (Eq. 7), considerando o ano de abertura em 2019 (ajustado para o projeto de pavimentação), período de projeto de 10 anos, o número N calculado a partir do método da USACE, é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Cálculo do número N (USACE)

ANO	VDM (corrigido)	N anual	N acumulado
2019	4160	$8,40 \times 10^6$	$8,40 \times 10^6$
2020	4285	$8,65 \times 10^6$	$1,71 \times 10^7$

ANO	VDM (corrigido)	N anual	N acumulado
2021	4413	$8,91 \times 10^6$	$2,60 \times 10^7$
2022	4546	$9,18 \times 10^6$	$3,51 \times 10^7$
2023	4682	$9,45 \times 10^6$	$4,46 \times 10^7$
2024	4823	$9,74 \times 10^6$	$5,43 \times 10^7$
2025	4967	$1,00 \times 10^7$	$6,44 \times 10^7$
2026	5116	$1,03 \times 10^7$	$7,47 \times 10^7$
2027	5270	$1,06 \times 10^7$	$8,53 \times 10^7$
2028	5428	$1,10 \times 10^7$	$9,63 \times 10^7$

Fonte: DNIT (2020b)

5.2.1.2 Classificação das Vias

De acordo com a Instrução de Projeto IP 02/2004, da Prefeitura Municipal de São Paulo, as vias urbanas são classificadas de acordo com o tráfego previsto para as mesmas. Os principais parâmetros utilizados na classificação são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Classificação das vias e parâmetros de tráfego

Função Predominante	Tráfego Previsto	Vida de Projeto	Volume Inicial Faixa mais carregada		N	N Característico
			Veículo leve	Caminhão /Ônibus		
Via local	Leve	10	100 a 400	4 a 20	$2,7 \times 10^4$ a $1,4 \times 10^5$	10^5
Via local e coletora	Médio	10	401 a 1500	21 a 100	$1,4 \times 10^5$ a $6,8 \times 10^5$	$5,0 \times 10^5$
Vias Coletoras e Estruturais	Meio Pesado	10	1501 a 5000	101 a 300	$1,4 \times 10^6$ a $3,1 \times 10^6$	$2,0 \times 10^6$
	Pesado	12	50001 a 10000	301 a 1000	$1,0 \times 10^7$ a $3,3 \times 10^7$	$2,0 \times 10^7$
	Muito Pesado	12	> 10000	1001 a 2000	$3,3 \times 10^7$ a $6,7 \times 10^7$	$5,0 \times 10^7$

Fonte: IP 02/2004 (2004)

Considera-se um tráfego muito pesado uma via que é caracterizada por um número N superior a $5,0 \times 10^7$. Analisando o N obtido no projeto básico ($9,63 \times 10^7$), nota-se que o trecho se enquadra nessa classificação.

5.2.2 Estudos Geotécnicos

Os estudos geotécnicos foram desenvolvidos a partir das análises realizadas no anteprojeto do segmento do encabeçamento de Alagoas. Foram compatibilizados, atualizados e complementados para definição dos parâmetros geotécnicos de acordo com a Instrução de Serviço IS- 206 (DNIT, 2020b).

5.2.2.1 Sondagem do Subleito

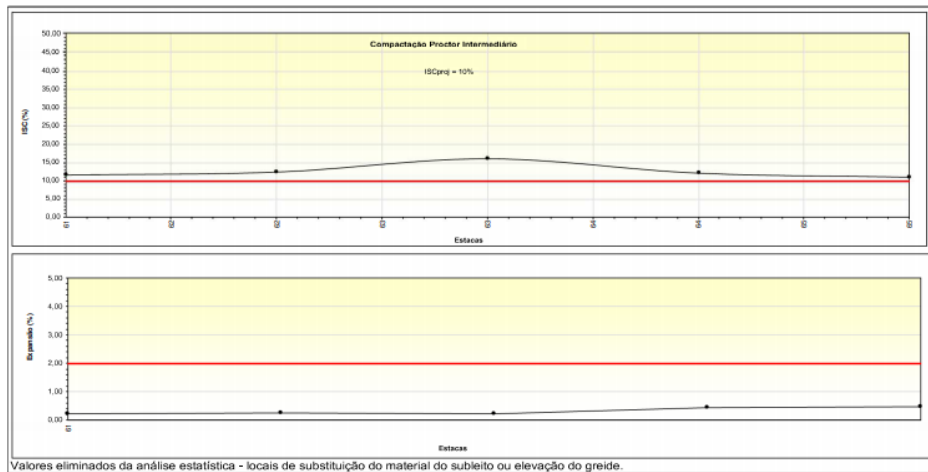
A terraplenagem do trecho em estudo é constituída principalmente de aterros. Na fase de anteprojeto foram executados 3 furos ao longo da pista esquerda, dos quais foram realizados ensaios de caracterização do solo. Com o intuito de confirmar os estudos do anteprojeto, foi realizado um quarto furo (DNIT, 2020b).

Dada a elevada espessura da camada de aterro, superior a 4 metros, tanto para efeitos de dimensionamento quanto na análise do comportamento mecânico propriamente dito, o maciço do aterro pode ser considerado, a fins de projeto, como o subleito do pavimento. Logo, para a caracterização do subleito no dimensionamento do pavimento utilizou-se o ISC das jazidas de empréstimo e não a caracterização dos solos locais (DNIT, 2020b).

5.2.2.2 Determinação do ISC de projeto

O valor de ISPROJ foi definido através de análises e estudos estatísticos dos resultados obtidos em ensaios de laboratório, com amostras representativas do subleito. Inicialmente, plotaram-se os valores de ISC e expansão nas condições ótimas de compactação da energia de referência dos Proctor normal, obtidos para o subleito ao longo do trecho. Com base na Figura 25, foi definido o segmento, dos locais para substituição do ponto de vista de suporte e expansão com ISC de projeto igual a 10% (DNIT, 2020b).

Figura 25 – ISC de projeto



Fonte: DNIT (2020)

5.2.3 Determinação da espessura das camadas

As espessuras das camadas foram calculadas pelo método do DNER, conforme as inequações do item 4.2.2 e as considerações que são apresentadas no Anexo A. Na Tabela 8 pode-se observar o resumo das espessuras das camadas obtidas.

Tabela 12 – Espessuras das camadas do pavimento (método DNER)

Camada	Espessura (cm)
Revestimento Asfáltico	12,5
Base	15,0
Sub-base	15,0
Subleito	-

Fonte: DNIT (2020)

Devido ao elevado tráfego da região de implantação, notou-se a necessidade de uma avaliação do dimensionamento a partir de critérios modernos de estruturação, baseados na análise mecânica dos pavimentos, por meio do programa de cálculo analítico denominado *Everstress Pavement Analysis Programs*, desenvolvido pelo *Washington State Department of Transportation – WSDOT* com base na Teoria da Elasticidade.

Após os cálculos efetuados utilizando-se as duas metodologias citadas anteriormente, de maneira que os esforços atuantes no pavimento não ultrapassassem os esforços resistentes dos materiais de cada camada, foram selecionadas as espessuras calculadas a partir do método mecânico para a execução da via (Tabela 13).

Tabela 13 – Espessuras das camadas do pavimento (Método Mecânico)

Camada	Espessura (cm)
Revestimento Asfáltico	12,5

Camada	Espessura (cm)
Base	20,0
Sub-base	20,0
Subleito	-

Fonte: DNIT (2020)

Apesar de, como supracitado, a estrutura do pavimento ter sido verificada mecanisticamente, a análise realizada pela empresa contratada pelo DNIT foi muito superficial, visto que consideraram materiais diferentes do que os que seriam utilizados de fato em campo.

5.2.3.1 Definição dos Materiais

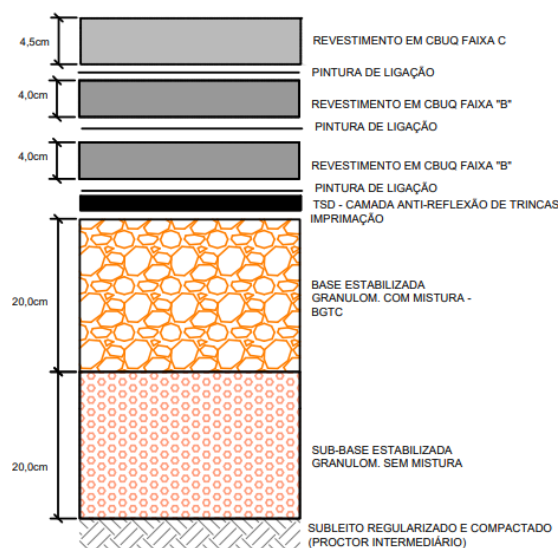
Revestimento asfáltico: será executado com camada de rolamento de 4,5 cm composta por CAUQ “faixa C” CAP 60/85 modificado com polímero e duas camadas de *binder* com 4,0 cm cada, utilizando CAUQ “faixa B” CAP-50/70.

Tratamento Superficial Duplo (TSD): será executado com a utilização de emulsão asfáltica de cura rápida, RR-2C.

Base Estabilizada Granulometricamente com mistura: A camada de base na terceira faixa e nos locais de melhoramento de curva será executada com mistura usinada de Brita Graduada Tratada com 3% de Cimento (BGTC).

Sub-base Estabilizada Granulometricamente: será executada em espessura constante de 20 cm, com utilização de cascalhos proveniente da jazida São João área 2.

Figura 26 – Estrutura do Pavimento



Fonte: DNIT (2020)

5.3 Aplicação no MeDiNa

O modo do software que foi utilizado no presente trabalho é o de “Projeto Novo”. A interface do programa MeDiNa divide as informações na tela principal em três abas: estrutura, modelagem e resultados. Ao iniciar o software, a tela inicial apresentada é na aba estrutura, onde são inseridas as informações do projeto, sendo elas: estrutura do pavimento; tráfego e painel onde o software registra o resumo dos resultados das análises ou dos dimensionamentos (Figura 27).

Figura 27 - Tela inicial MeDiNa

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

DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1 ^o ano):	1370
FV:	1.000
N anual total:	5,00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Eq:	5,00e+06

Fonte: DNIT (2020a)

A estrutura inicial do pavimento que é apresentada no software é dividida em 4 camadas, incluindo o subleito, e pode ser alterada desde que mantenha no mínimo 3 e no máximo 8 camadas. Na aba de estrutura, são apresentadas informações resumidas das propriedades de cada uma das camadas da estrutura do pavimento, como: material constituinte e o tipo selecionado, espessura, módulo de resiliência (se linear ou sigmoidal), e coeficiente de Poisson.

5.3.1 Estrutura do Pavimento e dados de tráfego

Para o cadastro da estrutura do pavimento no *software*, utilizou-se os dados obtidos a partir do dimensionamento semiempírico do DNER, conforme apresentado no item 5.2.3.1.

Conforme citado anteriormente, alguns parâmetros são essenciais para cadastrar os materiais no programa e realizar as verificações de maneira adequada no *software*.

Como o método de dimensionamento do DNER não exige a realização de ensaios para obter todas as características e propriedades que são necessárias no cadastro do material no *software* MeDiNa, se faz necessário adotar premissas para obter informações semelhantes à dos materiais que foram dimensionados. Desta forma, os dados não fornecidos em projeto foram obtidos por meio (i) da literatura sobre mecânica dos pavimentos e seus materiais, (ii) de publicações técnicas ou (iii) a partir de materiais similares já cadastrado no próprio MeDiNa.

- **Revestimento Asfáltico: Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ)**

Considerando que na etapa de execução a camada de revestimento será dividida em 3 camadas, onde uma delas será com CAUQ “faixa C” CAP 60/85 modificado com polímero (camada de rolamento) e as outras duas com CAUQ “faixa B” CAP-50/70 (camada de *binder*), foi necessária a divisão desses dois tipos de revestimento para realizar a análise mecânica no MeDiNa. Sendo assim, para a camada com CAUQ “faixa B” CAP-50/70, selecionou-se o material RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba presente no banco de dados do MeDiNa. Enquanto para o CAUQ modificado com AMP 60/85 foram considerados os parâmetros obtidos a partir do estudo realizado por Rossato (2015), o qual avaliou o fenômeno de fadiga de misturas asfálticas com diferentes tipos de ligantes.

Tabela 14 – Propriedades mecanicistas para o CAUQ “faixa C” AMP 60/85

Propriedade		Referência
Módulo de Resiliência	4.104	Rossato (2015)
Coefficiente de Poisson	0,35	Balbo (2007)
Resistencia à tração	1,58	Rossato (2015)
Classe de fadiga	4	MeDiNa
Fator de fadiga	1,62	
K1	0,3524	Rossato (2015)
K2	-1,19	

Tabela 15 – Propriedades mecanicistas para o CAUQ “faixa B” CAP-50/70

Propriedade		Referência
Módulo de Resiliência	9588	RJ CAP 50/70 #19,1 mm (MeDiNa)
Coefficiente de Poisson	0,30	
Resistencia à tração	2,04	
Classe de fadiga	1	
Fator de fadiga	0,67	
K1	$1,0 \times 10^{-12}$	
K2	-3,599	

O material selecionado para a camada de *binder* pertence ao banco de dados do MeDiNa e é o que apresenta maior semelhança com as propriedades de um CAUQ “faixa B” CAP-50/70, apesar de possuir um módulo de resiliência elevado. Realizou-se pesquisas com o objetivo de localizar estudos desse material para cadastrar as propriedades no *software*, mas não foram encontradas análises com dados da curva de fadiga adequados para cadastro no MeDiNa.

- **Base: Base Estabilizada Granulometricamente com cimento (BGTC)**

Como o material selecionado para a execução da base foi a BGTC, para essa análise no MeDiNa, entende-se como mais viável a utilização do material de BGTC cadastrado no banco de dados do *software*, visto que se trata de um material estabilizado granulometricamente com cimento. O material utilizado na base de dados do MeDiNa é proveniente de um estudo realizado por Balbo (1993).

Tabela 16 – Propriedades mecanicistas para a BGTC

Propriedade	Referência
Módulo de Resiliência	Sigmoidal
Coefficiente de Poisson	0,25
Teor de cimento	80,0
Resistencia à tração	1,25
K1	17,14
K2	-19,61

Balbo 1993 c: 80 kg/m³

- **Sub-base: Sub-base Estabilizada Granulometricamente**

De acordo com os estudos geotécnicos do material proveniente da jazida São João área 2 utilizado para a sub-base, o material presente nessa região é do tipo siltoso com pedregulhos. Logo, o material utilizado para a análise no MeDiNa será com base no material do banco de dados “areia argilo siltosa amarela com pedregulhos”, modificando apenas as características provenientes dos ensaios realizados com o material coletado no local

Tabela 17 – Propriedades mecanicistas para a sub-base

Propriedade	Referência
Módulo de Resiliência	2061
Coefficiente de Poisson	0,45
Massa específica	1,929
Umidade ótima	7,19
Abrasão Los Angeles	46,6
ψ_1	0,27
ψ_2	-0,14
ψ_3	1,33
ψ_4	0,06

Areia argilo siltosa com pedregulhos (sub-base) (MeDiNa)
Projeto básico (DNIT, 2020b)

- **Subleito: Solo Siltoso NS'**

No caso da regularização do subleito, que foi realizada com materiais de áreas de empréstimo, o material selecionado no MeDiNa será baseado no banco de materiais do próprio do *software*, utilizando o solo siltoso NS' e modificando apenas as características provenientes dos ensaios realizados com o material coletado no local.

Tabela 18 – Propriedades mecanicistas para a sub-base

Propriedade	Referência
Módulo de Resiliência	1200
Coefficiente de Poisson	0,40
ψ_1	0,244
ψ_2	0,419
ψ_3	1,309
ψ_4	0,069

Projeto básico (DNIT, 2020b)
Solo Siltoso NS' (MeDiNa)

A camada de antirreflexão de trincas foi selecionada de acordo com a base de dados do próprio *software*.

A estrutura dimensionada pelo método do DNER com base na descrição dos materiais que serão utilizados na execução do pavimento a ser considerada como a estrutura inicial no programa MeDiNa, é apresentada na Figura 28. Devido as restrições de espessuras estabelecidas no MeDiNa, notou-se a necessidade de realizar adequações nas camadas de revestimento. A camada de rolamento com CAUQ “faixa C” CAP 60/85 passou de 4,5 cm para 5,0 cm (valor mínimo permitido no programa) e as duas camadas de CAUQ “faixa B” CAP-50/70 foram unificadas em uma camada de 8,0 cm.

Figura 28 – Estrutura inicial do pavimento

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	CAP 60/85	5,0	4104	0,35
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19, 1mm Sepetiba	8	9588	0,30
3	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS	Tratamento Superficial Duplo	1,5	1000	0,25
4	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	20,0	Signoidal	0,25
5	MATERIAL GRANULAR	Areia argilo siltosa amarela c/ pedregulhos	20,0	2061	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Autora (2021)

Além disso, também foram inseridos dados referentes ao tipo de via e do Número N. Nessa via, como mencionado anteriormente, foi considerado o tipo de via sistema arterial Principal, com nível de confiabilidade de 95%. Para o número N, foram apenas inseridos os dados obtidos pelo estudo de tráfego apresentado no projeto básico, não sendo necessário o cálculo pelo programa.

Figura 29 – Dados de tráfego (MeDiNa)

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	23014
FV:	1,000
N anual (1º ano):	8,40e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	8,40e+06
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	9,63e+07

Fonte: Autora (2021)

De posse desses dados, foi então realizada a análise da estrutura do pavimento. Nesta opção, os principais resultados que o programa retorna são: a porcentagem de área trincada calculada até o final do período de projeto e o afundamento de trilha de roda, em milímetros, correspondente a soma de deformação de cada uma das camadas, ou seja, a deformação total para o período de projeto considerado.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Avaliação da estrutura proposta

Realizou-se uma análise no MeDiNa da estrutura proposta com os materiais que serão utilizados na execução do pavimento (Figura 30).

Figura 30 – Análise da estrutura inicial do pavimento

```

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

Nível de confiabilidade da análise: 95%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 94,1%
>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base
estabilizada.
Afundamento de Trilha de Roda: 2,3mm

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

```

Fonte: Autora (2021)

No decorrer da análise, o MeDiNa emitiu um alerta informando que o tráfego é elevado para a estrutura proposta. Ao verificar o resultado explanado pelo *software*, notou-se que o pavimento atingiu 94,1% de área trincada ao final do período de 10 anos proposto no projeto, ultrapassando o limite de 30% para o tipo de via. Nessa estrutura, o ATR, apresentou uma deformação de 1,8 mm. Logo, a ruptura do pavimento considerando o período de projeto seria apenas pelo dano por fadiga.

Tabela 19 – Evolução dos danos no pavimento

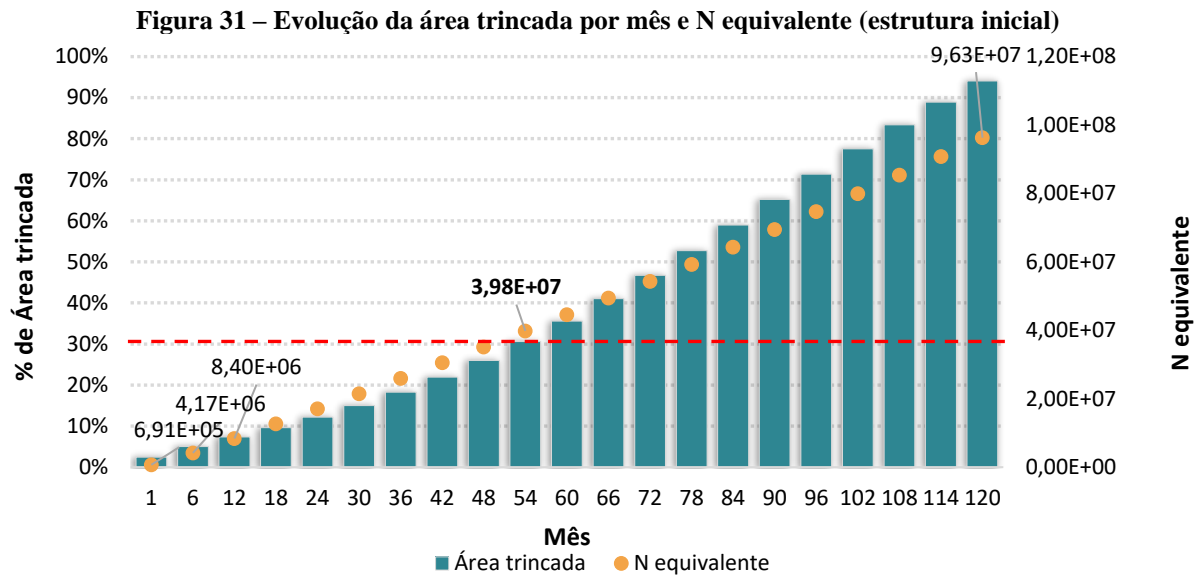
Mês	N equivalente	Área trincada	ATR
1	6,91E+05	2,44%	1,70
6	4,17E+06	5,05%	1,90
12	8,40E+06	7,32%	2,00
18	1,27E+07	9,63%	2,00
24	1,71E+07	12,16%	2,00
30	2,15E+07	15,01%	2,10
36	2,60E+07	18,25%	2,10
42	3,05E+07	21,92%	2,10
48	3,51E+07	26,03%	2,10
54	3,98E+07	30,60%	2,20
60	4,46E+07	35,61%	2,20
66	4,94E+07	41,01%	2,20
72	5,43E+07	46,75%	2,20
78	5,93E+07	52,76%	2,20
84	6,44E+07	58,94%	2,20
90	6,95E+07	65,19%	2,20
96	7,47E+07	71,41%	2,20
102	8,00E+07	77,51%	2,30
108	8,53E+07	83,37%	2,30
114	9,08E+07	88,92%	2,30
120	9,63E+07	94,09%	2,30

Fonte: Autora (2021)

De acordo com o detalhamento dos resultados apresentados pelo programa (Tabela 19), o pavimento atingiu o limite de 30% de área trincada no 54º mês, ou seja, com aproximadamente 4 anos e meio de abertura da via ao tráfego.

A partir da análise da estrutura do pavimento inserida no MeDiNa, pôde-se observar a evolução da área trincada a cada mês, desde o início do projeto, até o fim do período de 10 anos. Observa-se na

Figura 31, que o número N para o mês em que foi atingido o limite de área trincada corresponde a uma faixa aproximada de $3,98 \times 10^7$, que de acordo com o Quadro 6, representa um tráfego muito pesado.



Fonte: Autora (2021)

A tabela 20 apresenta os valores para a deformação permanente em cada camada da estrutura do pavimento.

Tabela 20 – Deformação permanente nas camadas

Camada	Deformação Permanente (mm)
Revestimento Asfáltico	0,00
Base	0,00
Sub-base	1,48
Subleito	0,80

Fonte: Autora (2021)

6.2 Dimensionamento proposto pelo MeDiNa

Conforme apresentado no item anterior, observou-se que a estrutura a ser executada no trecho não atendeu aos critérios de parada do MeDiNa, desta forma, foi realizado o redimensionamento das camadas com o intuito de alterar as espessuras, de maneira que a estrutura seja compatível com o tráfego da região.

6.2.1 Estrutura Proposta I

Primeiramente, realizou-se um dimensionamento pelo MeDiNa selecionando a camada de rolamento, que corresponde a camada com CAUQ “faixa C” e CAP modificado com polímero 60/85. O *software* realiza o dimensionamento aumentando gradativamente a espessura da camada selecionada. O MeDiNa iniciou o dimensionamento da camada selecionada com

uma espessura de 5 cm, como mostrado na estrutura inicial do pavimento (Figura 28). Conforme observado na (Figura 32), a estrutura apresentou um resultado positivo quando a camada selecionada atingiu uma espessura de 13,8 cm, ficando assim dentro do limite permitido de área trincada de acordo com os critérios de parada do MeDiNa.

Figura 32 – Estrutura proposta 1

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	CAP 60/85	13,8	4104	0,35
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19, 1mm Sepetiba	8,0	9588	0,30
3	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS	Tratamento Superficial Duplo	1,5	1000	0,25
4	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	20,0	Sigmoidal	0,25
5	MATERIAL GRANULAR	Areia argilo siltosa amarela c/ pedregulhos	20,0	2061	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Autora (2021)

Com essa estrutura, o *software* apresentou a avaliação (Figura 33), onde pode-se observar que no fim do período de 10 anos do projeto, esse pavimento apresentaria 28,4% da área trincada e 1,6 mm de ATR, atendendo os critérios estabelecidos para o tipo de via.

Figura 33 – Análise da estrutura proposta 1

```

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

Nível de confiabilidade da análise: 95%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 28,4%
>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base
estabilizada.
Afundamento de Trilha de Roda: 1,6mm

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

```

Fonte: Autora (2021)

Apesar do resultado positivo, essa estrutura não seria a mais viável economicamente, visto que o material asfáltico possui o maior custo dentre todos da estrutura. Sendo assim, propõe-se outras estruturas, modificando minimamente a camada de revestimento e aumentando as espessuras das camadas de base e sub-base, que possuem materiais mais viáveis financeiramente. Visto que, pelo método do DNER, tem-se que as espessuras das camadas de revestimento são definidas somente com base no nível de tráfego e não levando em consideração o comportamento por fadiga, conforme é realizado pelo método do MeDiNa.

6.2.2 Estrutura proposta 2

A estrutura proposta 2 apresenta modificações, conforme apresentadas na Tabela 21, na espessura da camada de base, sub-base e na camada de *binder* com CAUQ “faixa B” CAP-50/70 (Figura 34).

Tabela 21 – Modificação nas espessuras (estrutura proposta 2)

Camada	Espessura (cm)	
	Estrutura Inicial	Estrutura proposta
CAUQ “faixa C” CAP 60-85	5	5
CAUQ “faixa B” CAP-50/70	8	10
TSD	1,5	1,5
BGTC	20	26
Sub-base	20	35

Fonte: Autora (2021)

Figura 34 – Estrutura proposta 2 para execução

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	CAP 60/85	5	4104	0,35
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	10	9588	0,30
3	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS	Tratamento Superficial Duplo	1,5	1000	0,25
4	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	26	Sigmoidal	0,25
5	MATERIAL GRANULAR	Areia argilo silteosa amarela c/ pedregulhos	35	2061	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Autora (2021)

Ao avaliar a nova estrutura proposta, o MeDiNa apresenta resultados positivos para esse pavimento. Como pode-se observar na Figura 35, ao final do período de projeto, a estrutura apresentaria cerca de 29% de área trincada e 2,3 mm de ATR, estando dentro dos limites estabelecidos nos critérios de parada do MeDiNa para esse tipo de via.

Figura 35 – Análise da estrutura proposta 2

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---
 Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.
 Nível de confiabilidade da análise: 95%
 Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 29,0%
 >>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.
 Afundamento de Trilha de Roda: 2,3mm

Fonte: Autora (2021)

Nos meios práticos a camada de binder é utilizada como uma opção para baratear a construção da camada de revestimento, visto que a camada de binder possui uma maior quantidade de volume de vazios e conseqüentemente necessitando de uma menor quantidade de ligante asfáltico, uma vez que este possui um maior custo de aquisição. Diante deste cenário, visando a redução dos custos da estrutura do pavimento, propõe-se a análise da estrutura 3.

6.2.3 Estrutura proposta 3

Diante do exposto para a estrutura proposta 3 foi retirada apenas a camada de *binder* e manteve-se as demais, visto que a camada de TSD atua como uma camada de antirreflexão das trincas provenientes da camada de base estabilizada com cimento (BGTC). Com essa mudança (Tabela 24), também foi possível reduzir a espessura das camadas de rolamento CAUQ “faixa C” com CAP modificado com polímero 60/85, base e sub-base (Figura 36).

Tabela 22 – Modificação nas espessuras (estrutura proposta 3)

Camada	Espessura (cm)	
	Estrutura Inicial	Estrutura proposta
CAUQ “faixa C” AMP 60-85	5	5
CAUQ “faixa B” CAP-50/70	8	-
TSD	1,5	1,5
BGTC	20	15
Sub-base	20	15

Fonte: Autora (2021)

Figura 36 – Estrutura proposta 3 para execução

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	CAP 60/85	5	4104	0,35
2	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS	Tratamento Superficial Duplo	1,5	1000	0,25
3	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	15	Sigmoidal	0,25
4	MATERIAL GRANULAR	Areia argilo siltosa amarela c/ pedregulhos	15	2061	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Autora (2021)

Ao realizar a avaliação da estrutura no *software*, foram apresentados resultados bastante positivos. Como pode-se observar na Figura 37, ao final do período de projeto, a estrutura apresentaria somente 8,1% de área trincada e 4,1 mm de ATR, valores bem abaixo dos limites estabelecidos nos critérios de parada do MeDiNa para esse tipo de via.

Figura 37 – Análise da estrutura proposta 3

```

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

Nível de confiabilidade da análise: 95%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 8,1%
>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.
Afundamento de Trilha de Roda: 4,1mm

```

Fonte: Autora (2021)

Foi visto que com a retirada da camada de *binder* a estrutura proposta se mostrou como uma estrutura mais viável considerando o desempenho mecânico e aspectos econômicos, uma vez que pela estrutura proposta foi possível reduzir a espessura das camadas de base e sub-base, reduzindo então os custos dos materiais que irão compor essas camadas e dos serviços de terraplenagem. Desta forma, de acordo com os dados utilizados do banco de dados do MeDiNa, é possível verificar que essa prática da utilização da camada de *binder* para a redução dos custos das obras de pavimentação deve ser utilizada de forma mais criteriosa com base em análises mecânicas do pavimento.

Vale lembrar que o MeDiNa ainda se encontra em fase de calibração através da execução de segmentos experimentais em rodovias federais por todo o país, por meio do PRO-MeDiNa. A calibração ocorre por meio da avaliação da previsão dos dados obtidos em ensaios de laboratório com aqueles verificados em campo nas pistas experimentais.

6.3 Impacto Financeiro

Com a apresentação das estruturas propostas, pode-se realizar uma análise financeira, verificando quais os impactos de custos para a execução de cada uma delas. Esse estudo foi realizado utilizando como base de dados os serviços presentes no Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO para o estado de Alagoas e com mês de referência Abril/2021.

Os valores apresentados na tabela abaixo são referentes a execução dos serviços de cada camada, sem contemplar o transporte.

Tabela 23 – Impacto financeiro das estruturas propostas

	Estrutura projeto básico - execução	Est. Prop. 1	Est. Prop. 2	Est. Prop. 3
Descrição	Preço total	Preço total	Preço total	Preço total
Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa	R\$ 162.257,36	R\$ 356.966,18	R\$ 162.257,36	R\$ 162.257,36

	Estrutura projeto básico - execução	Est. Prop. 1	Est. Prop. 2	Est. Prop. 3
Descrição	Preço total	Preço total	Preço total	Preço total
C - areia e brita comerciais				
Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	R\$ 247.708,39	R\$ 247.708,39	R\$ 309.635,48	-
Tratamento superficial duplo com emulsão - brita comercial	R\$ 33.361,92	R\$ 33.361,92	R\$ 33.361,92	R\$ 33.361,92
Base de brita graduada tratada com cimento com brita comercial	R\$ 316.772,35	R\$ 316.772,35	R\$ 411.804,06	R\$ 237.579,26
Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida	R\$ 14.100,48	R\$ 14.100,48	R\$ 24.675,84	R\$ 10.575,36
TOTAL	R\$ 774.200,49	R\$ 968.909,32	R\$ 941.734,66	R\$ 443.773,90

Fonte: Autora (2021)

Com esses valores, foi possível verificar o percentual de acréscimos ou decréscimos dos custos das estruturas propostas com relação ao que foi definido no projeto executivo (Tabela 24).

Tabela 24 – % do Impacto financeiro das estruturas propostas

Estrutura proposta	Valor da estrutura	Valor Estrutura original	% Acréscimo/decréscimo
Estrutura proposta 1	R\$ 968.909,32		+25%
Estrutura proposta 2	R\$ 941.734,66	R\$ 774.200,49	+22%
Estrutura proposta 3	R\$ 443.773,90		-43%

Fonte: Autora (2021)

Analisando a Tabela 24, nota-se que a estrutura 2 é a única estrutura proposta que possui um custo menor do que a estrutura original apresentada no projeto executivo, uma vez que esta proposta apresenta uma redução na ordem de 43% no custo final das construções das camadas. Sendo assim, a estrutura proposta 2 seria a estrutura mais indicada para a execução da via em estudo de acordo com os critérios técnicos e financeiros.

6.4 Verificação da influência da sobrecarga

Como citado no tópico 4.2.5, a sobrecarga nos eixos dos veículos, que é permitida por lei, não é considerada no momento do dimensionamento das estruturas dos pavimentos. Com o intuito de verificar a influência desse acréscimo de carregamento no desempenho do pavimento

durante o período de projeto, analisou-se as três estruturas apresentadas no tópico 6.2 incrementando 12,5% na carga de cada eixo, limite máximo permitido pelo CONTRAN.

Para verificar o efeito da sobrecarga, foi necessário calcular um novo número de repetições do eixo padrão (N) considerando o aumento de carga nos quatro principais tipos de eixo comercial. Desta forma, obteve-se um novo fator de carga equivalente ao carregamento considerando este cenário de sobrepeso (Tabela 25).

Tabela 25 – Cálculo número N com efeito de sobrecarga

ANO	VDM	FV = 10,97		FV = 22,24	
		Sem sobrecarga		Com sobrecarga	
		N	N acumulado	N	N acumulado
2019	4160	8,39E+06	8,39E+06	1,69E+07	1,69E+07
2020	4284	8,64E+06	1,70E+07	1,74E+07	3,43E+07
2021	4413	8,90E+06	2,59E+07	1,79E+07	5,22E+07
2022	4545	9,17E+06	3,51E+07	1,84E+07	7,06E+07
2023	4682	9,44E+06	4,45E+07	1,90E+07	8,96E+07
2024	4822	9,72E+06	5,43E+07	1,96E+07	1,09E+08
2025	4967	1,00E+07	6,43E+07	2,02E+07	1,29E+08
2026	5116	1,03E+07	7,46E+07	2,08E+07	1,50E+08
2027	5269	1,06E+07	8,52E+07	2,14E+07	1,72E+08
2028	5427	1,09E+07	9,63E+07	2,20E+07	1,94E+08

Fonte: Autora (2021)

Considerando o cenário de sobrecarga dos eixos comerciais, ao fim do período de projeto de 10 anos, o número N passou de 9,63E+07 para 1,94E+08, o que equivale a uma diferença de 50,31% no número N, ou seja, com uma sobrecarga de 12,5%, a solicitação no pavimento seria o dobro para o mesmo número de veículos circulantes na via.

6.4.1 Estrutura proposta 1

Figura 38 – Estrutura proposta 1 com efeitos da sobrecarga

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	CAP 60/85	13,8	4104	0,35
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	8,0	9588	0,30
3	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS	Tratamento Superficial Duplo	1,5	1000	0,25
4	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	20,0	Sigmoidal	0,25
5	MATERIAL GRANULAR	Areia argilo silteosa amarela c/ pedregulhos	20,0	2061	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	46301
FV:	1,000
N anual (1º ano):	1,69e+07
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	1,69e+07
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	1,94e+08

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---	
Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.	
Nível de confiabilidade da análise: 95%	
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 72,5%	
>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.	
Afundamento de Trilha de Roda: 1,6mm	
--- ALERTAS ---	
Tráfego elevado para a estrutura proposta.	

Fonte: Autora (2021)

Observa-se na Figura 38 que com o acréscimo de carga nos eixos, a estrutura apresenta 72,5% de área trincada no fim do projeto, deixando de atender os critérios de parada do MeDiNa para esse tipo de via, o qual aceita 30% de área trincada.

Tabela 26 – Evolução dos danos na estrutura proposta 1 com sobrecarga

Mês	N equivalente	Área trincada	ATR
1	1,39E+06	2,24%	1,20
6	8,39E+06	4,51%	1,30
12	1,69E+07	6,37%	1,40
18	2,55E+07	8,15%	1,40
24	3,43E+07	10,01%	1,50
30	4,32E+07	12,04%	1,50
36	5,22E+07	14,28%	1,50
42	6,14E+07	16,76%	1,50
48	7,07E+07	19,51%	1,50
54	8,01E+07	22,56%	1,50
60	8,97E+07	25,91%	1,50
66	9,95E+07	29,57%	1,60
72	1,09E+08	33,53%	1,60
78	1,19E+08	37,77%	1,60
84	1,30E+08	42,28%	1,60
90	1,40E+08	47,02%	1,60

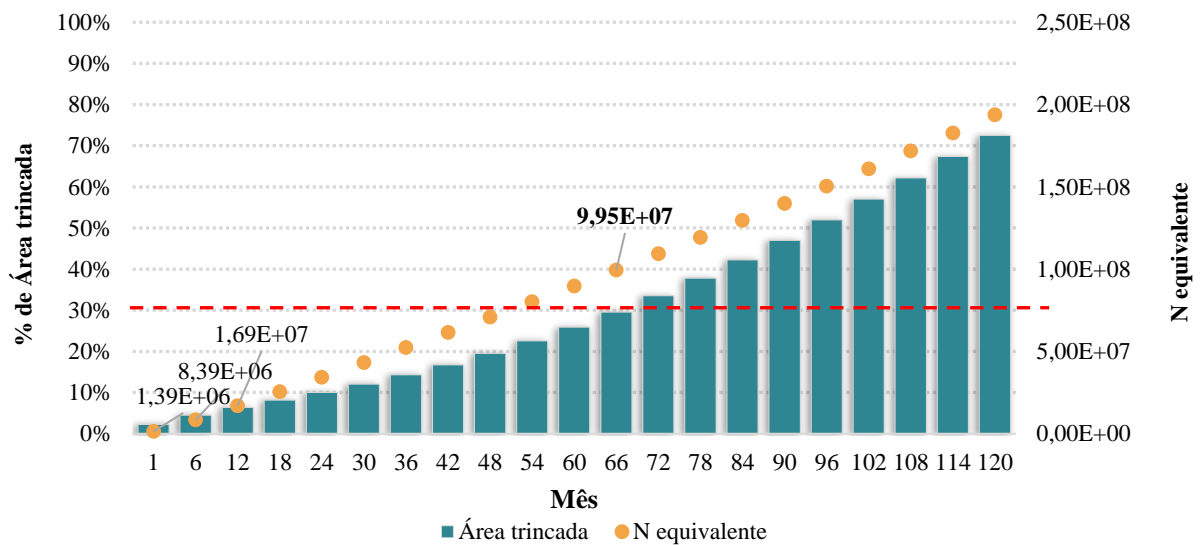
Mês	N equivalente	Área trincada	ATR
96	1,50E+08	51,94%	1,60
102	1,61E+08	57,01%	1,60
108	1,72E+08	62,15%	1,60
114	1,83E+08	67,33%	1,60
120	1,94E+08	72,47%	1,60

Fonte: Autora (2021)

De acordo com o detalhamento dos resultados apresentados pelo programa (Tabela 26), o pavimento atingiu o limite de 30% de área trincada aproximadamente no 66º mês, ou seja, na faixa de 5 anos e meio de abertura da via ao tráfego, ocasionando em uma redução de 4 anos e meio na vida útil do pavimento

A partir da análise realizada na Tabela 26, pode-se observar na Figura 39 a evolução dos danos nessa estrutura. Nota-se que o número N para o mês em que foi atingido o limite de área trincada corresponde a uma faixa aproximada de $9,95 \times 10^7$, que de acordo com o Quadro 6, representa um tráfego muito pesado.

Figura 39 – Evolução da área trincada por mês e N equivalente (estrutura proposta 1 com sobrecarga)



Fonte: Autora (2021)

6.4.2 Estrutura proposta 2

Ao modificar os dados de tráfego na estrutura proposta 2, obteve-se o resultado apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Estrutura proposta 2 com efeitos da sobrecarga

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	CAP 60/85	5,0	4104	0,35
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19, 1mm Sepetiba	10,0	9588	0,30
3	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS	Tratamento Superficial Duplo	1,5	1000	0,25
4	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	26,0	Sigmoidal	0,25
5	MATERIAL GRANULAR	Areia argilo siltosa amarela c/ pedregulhos	35,0	2061	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO		--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---	
DADOS DO TRÁFEGO		Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal	Nível de confiabilidade da análise: 95%	
VMD (1º ano):	46301	Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 74,1%	
FV:	1.000	>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.	
N anual (1º ano):	1.69e+07	Afundamento de Trilha de Roda: 2,4mm	
% Veículos na faixa de projeto:	100	--- ALERTAS ---	
N Anual da faixa:	1.69e+07	Tráfego elevado para a estrutura proposta.	
Taxa de crescimento (%):	3,0		
Período de projeto (anos):	10		
N Total:	1,94e+08		
N anual (1º ano):			
Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano)			

Fonte: Autora (2021)

Assim como na estrutura anterior, o acréscimo de carga nos eixos comerciais resultou em uma área trincada de 74,1% no fim do período de projeto, deixando de atender os critérios de parada do MeDiNa para esse tipo de via.

A partir da análise no MeDiNa, pode-se verificar a evolução dos danos na estrutura proposta 2 ao longo dos 10 anos de projeto (Tabela 27). Observa-se que, assim como na estrutura proposta 1, o pavimento atingiu o limite de 30% de área trincada no 66º mês, apresentando a mesma evolução mostrada na Figura 39.

Tabela 27 – Evolução dos danos na estrutura proposta 2 com sobrecarga.

Mês	N equivalente	Área trincada	ATR
1	1,39E+06	2,25%	1,80
6	8,39E+06	4,55%	2,00
12	1,69E+07	6,44%	2,10
18	2,55E+07	8,25%	2,20
24	3,43E+07	10,15%	2,20
30	4,32E+07	12,23%	2,20
36	5,22E+07	14,52%	2,30
42	6,14E+07	17,08%	2,30
48	7,07E+07	19,92%	2,30
54	8,01E+07	23,06%	2,30
60	8,97E+07	26,51%	2,30
66	9,95E+07	30,28%	2,30
72	1,09E+08	34,36%	2,40

Mês	N equivalente	Área trincada	ATR
78	1,19E+08	38,73%	2,40
84	1,30E+08	43,36%	2,40
90	1,40E+08	48,21%	2,40
96	1,50E+08	53,25%	2,40
102	1,61E+08	58,41%	2,40
108	1,72E+08	63,65%	2,40
114	1,83E+08	68,89%	2,40
120	1,94E+08	74,08%	2,40

Fonte: Autora (2021)

6.4.3 Estrutura proposta 3

Ao modificar os dados de tráfego na estrutura proposta 3, obteve-se o resultado apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Estrutura proposta 3 com efeitos da sobrecarga

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	CAP 60/85	5,0	4104	0,35
2	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS	Tratamento Superficial Duplo	1,5	1000	0,25
3	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	15,0	Sigmoidal	0,25
4	MATERIAL GRANULAR	Areia argilo siltosa amarela c/ pedregulhos	15,0	2061	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	46301
FV:	1.000
N anual (1º ano):	1,69e+07
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	1,69e+07
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	1,94e+08
N anual (1º ano): Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano)	

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---
Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.
Nível de confiabilidade da análise: 95%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 14,4%
>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.
Afundamento de Trilha de Roda: 4,4mm

Fonte: Autora (2021)

Diferente das estruturas anteriores, a estrutura proposta 3 foi a única que apresentou resultado de área trincada no fim do período de projeto menor que os 30% estabelecido como critério de parada do MeDiNa, exibindo uma área trincada de 14,4% no 10º ano de serviço da rodovia. Porém, ainda assim, apresentou acréscimo na área trincada, quando comparada com a estrutura sem sobrecarga nos eixos.

Diante dos resultados obtidos por meio da análise do efeito da sobrecarga nos eixos comerciais, foi visto que para as estruturas que consideram a construção da camada de *binder*, técnica utilizada com objetivo de reduzir os custos na construção dos pavimentos, não atendeu aos critérios de dimensionamento estabelecidos pelo método do MeDiNa (área trincada superior ao limite de 30%), mostrando mais uma vez que o uso desta técnica deve ser utilizada de forma criteriosa, considerando as análises mecânicas dos pavimentos.

6.5 Viabilidade da aplicação do MeDiNa em Alagoas

6.5.1 Estudo de caso – AL-104

Como pode ser visto nos tópicos supracitados, o MeDiNa é um *software* que precisa de mais precisão nos dados a serem estudados. Para isso, são necessários ensaios específicos, de maneira que possam ser adquiridas informações sobre o trincamento por fadiga de materiais asfálticos e parâmetros de deformação permanente para o restante dos materiais.

Devido à complexidade de estudo desses materiais que serão utilizados em campo, visto que nem todos os estados do Brasil possuem estrutura física e mão de obra para executar tais verificações por meio de ensaios laboratoriais, realizou-se uma análise no MeDiNa de uma rodovia com baixo nível de tráfego para verificar se o método do DNER é eficaz nesses casos.

Para o estudo em questão, foi selecionado um trecho do Povoado Utinga ao Entroncamento com a BR 316/AL pertencente a rodovia AL-104 no estado de Alagoas. Para esse projeto o N calculado foi de $5,40 \times 10^6$, que de acordo com o Quadro 6, representa um meio pesado. Além disso, a rodovia é de Classe III, ou seja, um sistema arterial primário.

A estrutura do pavimento foi cadastrada com materiais da base de dados do MeDiNa semelhantes aos apresentados no projeto básico da rodovia.

Figura 42 – Análise AL-104 no MeDiNa

ESPOSIVEL: EMPRESA:

ROJETO: MODO:

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	7,0	8289	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	15	381	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Areia argilo siltsosa c/ pedregulho (excl. de 4,75mm)	20	2061	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltsoso NS'	0,0	189	0,45

Entre com os dados dos materiais

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1479
FV:	1.000
N anual (1º ano):	5,40e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,40e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,40e+06

N Anual da faixa:
Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---

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

Nível de confiabilidade da análise: 85%

Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 29,2%

Afundamento de Trilha de Roda: 6,2mm

Fonte: Autora (2021)

Nota-se que para um tráfego mais leve, a estrutura proposta pelo DNER foi suficiente para suportar os esforços sobre o pavimento nos 10 anos de vida útil do pavimento, atingindo cerca de 29% de trincamento do revestimento no final de período do projeto.

6.5.2 Estudo de caso – AL-105

A estrutura a ser analisada a seguir corresponde a um trecho da rodovia AL-105 do Povoado Cachoeira do Meirim – Entr. AL-430 (São Luiz do Quitunde), com extensão total de 28,0 km. Para esse projeto o N calculado foi de $4,85 \times 10^6$, que de acordo com o Quadro 6 representa um tráfego meio pesado. Além disso, a rodovia é de Classe III, ou seja, um sistema arterial primário.

Assim como no estudo de caso anterior, a estrutura do pavimento foi cadastrada com materiais da base de dados do MeDiNa semelhantes aos apresentados no projeto básico da rodovia.

Figura 43 – Análise AL-105 no MeDiNa

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	5,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	17,0	381	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Areia argilo siltosa c/ pedregulho	26	2061	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1329
FV:	1.000
N anual (1º ano):	4,85e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	4,85e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	4,85e+06

--- 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: 28,7%	
Afundamento de Trilha de Roda: 7,3mm	

% Veículos na faixa de projeto:
 Percentual de veículos na faixa de tráfego de projeto, para o caso de pistas com mais de uma faixa de rolamento

Fonte: Autora (2021)

Assim como a estrutura analisada da AL-104, a avaliação do pavimento pelo *software* MeDiNa apresentou resultados positivos durante todo o período de projeto do pavimento, com área trincada estimada do pavimento no fim do período de 28,7% e afundamento de trilha de roda de 7,3mm.

Com esses dois exemplos, pode-se verificar que para tráfegos mais leves, o método do DNER apresenta resultados positivos.

6.5.3 Pesquisa de laboratórios

Com o intuito de verificar a viabilidade da aplicação do MeDiNa no estado de Alagoas, realizou-se pesquisas com laboratórios como o da Universidade Federal de Alagoas para apurar se nesse local realiza-se o ensaio de compressão diametral de tração indireta com tensão constante, o qual analisa a curva de fadiga dos materiais asfálticos. Porém, esse ensaio não é realizado no laboratório da Universidade.

Ao conversar com colaborador do DNIT/AL, também se obteve uma resposta negativa para a existência de laboratórios no estado que realize essa análise. Informou-se que para verificar os materiais sobre essas condições, deve-se encaminhar uma amostra para outros estados, o que aumenta o custo em orçamento do projeto.

7. CONCLUSÕES

O Método semiempírico do DNER, cujo vem sendo o utilizado para dimensionamento de pavimentos nos últimos anos, realiza análises considerando apenas as deformações no topo do subleito do pavimento, baseando-se nos ensaios do CBR. A análise mecanicista-empírica surgiu com a necessidade de avaliar os danos de trincamento por fadiga causados nas camadas asfálticas e a deformação permanente nas camadas granulares. Com esse cenário, pode-se analisar a estrutura do pavimento do trecho da BR-101 com camadas dimensionadas por meio do método do DNER.

O trecho selecionado trata-se de um segmento que recebe um nível de tráfego elevado, o que é evidenciado pelo número de repetições do eixo padrão rodoviário N apresentado no projeto básico. A análise no MeDiNa apontou que a estrutura do pavimento proposta no projeto básico para execução não atende os critérios necessários de desempenho do pavimento, visto que atinge o limite de 30% de área trincada antes dos 10 anos de serviço, causando a ruptura total do pavimento. Salienta-se que, as características e propriedades dos materiais cadastrados na estrutura no *software* não correspondem exatamente ao que foi executado em campo, mas apresentam uma boa aproximação e resultados aptos para análise.

Os resultados apresentados na avaliação do pavimento exibem um percentual de área trincada elevado, indicando um alto dano por fadiga, enquanto a deformação permanente que é demonstrada a partir do afundamento de trilha de roda, mantem-se dentro dos limites estabelecidos pelo MeDiNa para o tipo de via em análise. Isso pode ser explicado, pois os danos por fadiga não eram previstos no método de dimensionamento do DNER.

A avaliação das novas estruturas propostas para execução mostrou que todas apresentam desempenho dentro dos critérios estabelecidos pelo MeDiNa, porém, verificou-se que a estrutura que apontou um melhor resultado foi a proposta 3, sem utilização da camada de *binder*. Essa estrutura exibiu um percentual de área trincada com cerca de 21% a menos do que as outras no fim do período de projeto, possibilitando ainda a redução da espessura das camadas de base e sub-base. Por conta disso, a estrutura proposta 3 conseguiu apresentar uma redução na ordem de 43% no custo total do serviço de pavimentação.

Um fator importante que deve ser levado em consideração é o impacto causado no pavimento a partir da sobrecarga nos eixos dos veículos comerciais. É de conhecimento geral que o excesso de peso que é permitido pelo CONTRAN não é considerado em nenhum modelo

de dimensionamento de pavimentos e isso gera um grande impacto na vida útil do pavimento. Com base nas análises realizadas no presente trabalho, foi possível verificar o acréscimo no número de repetições do eixo padrão, que aumentou consideravelmente com a inclusão do percentual de carga permitida sobre os eixos dos veículos. A partir disso, observou-se que nesse cenário, diferente de anteriormente, duas estruturas propostas deixaram de atingir o desempenho esperado. A estrutura 3, apesar da sobrecarga, ainda se manteve dentro do limite esperado de desempenho apresentado pelo MeDiNa.

Após as análises, constatou-se que com a retirada da camada de *binder* a estrutura proposta se mostrou como a mais viável considerando os aspectos mecânicos, financeiros e de sobrecarga. A determinação da espessura da camada de revestimento por meio do método do DNER está relacionada apenas ao número N, com isso, existe a possibilidade de a espessura obtida por meio deste método ser superdimensionada, visto que este não considera os critérios de fadiga e de deformação permanente. Sendo assim, verifica-se que a possibilidade de utilizar a camada de *binder* com o intuito de reduzir os custos na construção da camada de revestimento asfáltico pode ser uma técnica falha. É válido ressaltar que, o MeDiNa ainda está em fase de calibração pelo programa PRO-MeDiNa e além disso, para confirmar os dados apresentados no presente trabalho, é de suma importância a realização de ensaios de análise quanto a fadiga e deformação permanente dos materiais que serão utilizados em campo para a execução da estrutura do pavimento.

Por fim, conclui-se que o MeDiNa requer um estudo bem aprofundado dos materiais que serão utilizados em campo, de maneira a evitar possíveis resultados que não condizem com a realidade. Para isso, conforme foi observado no tópico de viabilidade de aplicação do MeDiNa, nota-se a necessidade de investimentos em laboratórios e profissionais capacitados em todos os estados do Brasil, com o objetivo de facilitar e tornar viável o estudo das propriedades dos materiais. Além disso, também foi possível verificar que para os casos de rodovias com baixo nível de tráfego a estrutura proposta pelo DNER se mostrou eficiente, com isso cabe um questionamento se o MeDiNa seria necessário para o dimensionamento de todos os tipos de rodovias ou apenas para rodovias com níveis de tráfego de médio a pesado, visto que esse método apresenta um custo maior do que o que vem sendo utilizado do DNER.

Sendo assim, recomenda-se para trabalhos futuros, o estudo de fato dos materiais que serão utilizados em campo, para assim ter a concretização dos resultados analisados. Além

disso, nota-se também a necessidade de um estudo aprofundado da viabilidade de aplicação do dimensionamento por meio do MeDiNa para diferentes níveis de tráfego.

REFERÊNCIAS

- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**, São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- 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.
- BEZERRA NETO, R. S. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. Dissertação (Mestrado), São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.
- CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?.** Brasília, 2017.
- CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa de rodovias 2019: Relatório Gerencial**. Brasília, 2019.
- Código de Trânsito Brasileiro – CTB – Lei nº 9.503, de 23 de Setembro de 1997.
- COUTINHO, J. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho**. Dissertação (Mestrado), Ouro Preto: UFOP, 2011.
- CRONEY, D.; CRONEY, P. **The design and performance of pavements**, 2nd ed., London: Her Majesty's Stationery Office, Transport and Road Research Laboratory, 1991.
- DNER. **Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos. DNER-PRO 159/85**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1985.
- DNIT. **Manual de pavimentação. Publicação IPR-697**. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.
- TIEFENSEE, M. D.; QUEBAUD, M.R.; MEIRELLES, E. B.; BRITO, L. A. T.; MENSCH, N. G.; REIS, F. P.; **Avaliação Da Influência Da Sobrecarga Dos Veículos Pesados Na Rodovia BR-290/RS**. Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Recife, 2017.

DNIT. **Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Norma 183/2018 – ME.** Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.

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

DNIT. **Projetos Básico e Executivo de Readequação, Duplicação e Implantação de Variante, Encabeçamento de Ambos os Lados da Ponte sobre o Rio São Francisco, Readequação da Interseção da BR 101/SE com a SE-200 e Acesso a Cidade de Propriá/SE, na BR-101/AL e BR-101/SE.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Sergipe, 2020b.

FERREIRA, F. **Análise do dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando o programa SisPavBR.** Graduação, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

FONSECA, L. **Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA 2a Etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.** Mestrado, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2013.

FONTENELE, B.H. **Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de Espectros de Carga por Eixo e seu Efeito no Desempenho dos Pavimentos.** Tese (Doutorado), São Carlos: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

FRANCO, F. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SisPav.** Tese (Doutorado), Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão de Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecanístico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2009.

MEDINA, J.; MOTTA, L. **Mecânica dos Pavimentos**. 3a edição ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MOTTA, L. M. G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. Tese (Doutorado), Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1991.

PITANGUI, L.C. **Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa**. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

ROSSATO, F.P. **avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SÃO PAULO. **IP-02/2004 - Classificação das Vias**. Secretaria de Infraestrutura Urbana, 2004.

SILVA, C. F. S. C. **Análise de Tensões em Pavimentos a Partir de Modelo Físico Instrumentado**. Dissertação (Mestrado), Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

SOUZA, M. L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, IPR, 1981 (IPR Publ. 667).

SOUZA JÚNIOR, J. G. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. Dissertação (Mestrado), Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2018.

TORQUATO E SILVA, S. A. *et al.* **Método simplificado para a consideração da aderência entre camadas no dimensionamento de pavimentos asfálticos**. ANPET, Balneário Camboriú, 2019.

ANEXO A – Dimensionamento do pavimento pelo método do DNER

<u>Características do subleito</u>			<u>Características do reforço</u>		
ISC projeto	m =	10	ISC	n =	0

<u>Características dos materiais empregados no pavimento</u>					
Coeficiente de Equivalência Estrutural			ISC (%)		
Base	K_{a_1}	1,00	80	← ISC > 80	
Sub-Base	K_{s_1}	1,00	20		
Reforço	K_{ref}	-	-		

Revestimento	K_{a_2}	2,0	espessura	12,5	cm
--------------	-----------	-----	-----------	------	----

ESPESSURAS EQUIVALENTES								
	R B h_{20} h_n	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">H_{20}</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">31</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">H_n</td> <td style="text-align: center;">48</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">H_m</td> <td style="text-align: center;">-</td> </tr> </table>	H_{20}	31	H_n	48	H_m	-
H_{20}	31							
H_n	48							
H_m	-							

<u>Parâmetros atuantes no pavimento</u>	
Número terminal de solicitações do eixo-padrão (UEACE)	0,63E+07
Pressão de contato pneu-pavimento	81,52

<u>Cálculo das espessuras</u>	
-------------------------------	--

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">Base</td> <td style="border: 1px solid black;">$R \cdot K_{a_1} + B \cdot K_{a_2} \geq H_{20}$</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;"></td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">$B = 6$ cm</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">adotado</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">$B = 15$ cm</td> </tr> </table>	Base	$R \cdot K_{a_1} + B \cdot K_{a_2} \geq H_{20}$		$B = 6$ cm	adotado	$B = 15$ cm	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">RESUMO</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">ESPESSURAS (cm)</td> </tr> <tr> <td style="width: 70%;">Revestimento</td> <td style="text-align: right;">12,5</td> </tr> <tr> <td>Base</td> <td style="text-align: right;">15</td> </tr> <tr> <td>Sub-Base</td> <td style="text-align: right;">15</td> </tr> <tr> <td>Reforço</td> <td style="text-align: right;">0</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td style="text-align: right;">42,5</td> </tr> </table>	RESUMO		ESPESSURAS (cm)		Revestimento	12,5	Base	15	Sub-Base	15	Reforço	0	Total	42,5
Base	$R \cdot K_{a_1} + B \cdot K_{a_2} \geq H_{20}$																				
	$B = 6$ cm																				
adotado	$B = 15$ cm																				
RESUMO																					
ESPESSURAS (cm)																					
Revestimento	12,5																				
Base	15																				
Sub-Base	15																				
Reforço	0																				
Total	42,5																				
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">Sub-Base</td> <td style="border: 1px solid black;">$R \cdot K_{a_1} + B \cdot K_{a_2} + h_{20} \cdot K_{s_1} \geq H_n$</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;"></td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">$h_{20} = 8$ cm</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">adotado</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">$h_{20} = 15$ cm</td> </tr> </table>	Sub-Base	$R \cdot K_{a_1} + B \cdot K_{a_2} + h_{20} \cdot K_{s_1} \geq H_n$		$h_{20} = 8$ cm	adotado	$h_{20} = 15$ cm															
Sub-Base	$R \cdot K_{a_1} + B \cdot K_{a_2} + h_{20} \cdot K_{s_1} \geq H_n$																				
	$h_{20} = 8$ cm																				
adotado	$h_{20} = 15$ cm																				
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">Reforço</td> <td style="border: 1px solid black;">$R \cdot K_{a_1} + B \cdot K_{a_2} + h_{20} \cdot K_{s_1} + h_n \cdot K_{ref} \geq H_m$</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;"></td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center;">$h_m =$ cm</td> </tr> </table>	Reforço	$R \cdot K_{a_1} + B \cdot K_{a_2} + h_{20} \cdot K_{s_1} + h_n \cdot K_{ref} \geq H_m$		$h_m =$ cm																	
Reforço	$R \cdot K_{a_1} + B \cdot K_{a_2} + h_{20} \cdot K_{s_1} + h_n \cdot K_{ref} \geq H_m$																				
	$h_m =$ cm																				