

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS- UFAL
CAMPUS DO SERTÃO
ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ EMERSON GONÇALVES SILVA

**MÉTODO NACIONAL DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS -MEDINA,
AVALIAÇÃO DA DUPLICAÇÃO DA AL-145**

Delmiro Gouveia-AL

JOSÉ EMERSON GONÇALVES SILVA

**MÉTODO NACIONAL DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS -MEDINA,
AVALIAÇÃO DA DUPLICAÇÃO DA AL-145**

Projeto de graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: David Anderson Cardoso Dantas

Delmiro Gouveia-AL

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza – CRB-4 2209

S586m Silva, José Emerson Gonçalves

Método nacional de dimensionamento de pavimentos – medina, avaliação da duplicação da AL-145 / José Emerson Gonçalves Silva. – 2018.

78 f. : il.

Orientação: Prof. Me. David Anderson Cardoso Dantas.
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2018.

1. Pavimentação de rodovia. 2. Rodovia AL-145. 3. Método Nacional de Dimensionamento de pavimentos. 4. Dimensionamento. 5. Avaliação.
I. Título.

CDU: 625.75

Folha de Aprovação

JOSÉ EMERSON GONÇALVES SILVA

**MÉTODO NACIONAL DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS -MEDINA,
AVALIAÇÃO DA DUPLICAÇÃO DA AL-145**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do Curso de Engenharia civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão e aprovado em 09 de outubro de 2018.



Prof. MSc David Anderson Cardoso Dantas - UFAL/Campus do Sertão (Orientador)

Banca examinadora:



Prof. MSc Salvatore Verde - UFAL/Campus do Sertão (Examinador Interno)



Prof. Dr. Thiago Alberto da Silva Pereira- UFAL/Campus do Sertão (Examinador Interno)

Dedico esse trabalho ao Pai do Céu.

Por me presentear com uma família afetuosa, unida e de muita força espiritual, o meu mais precioso trunfo.

Pela virtude de conquistar a confiança e companhia dos meus inestimáveis amigos que muito me ensinam e alegam.

Nunca estarei preparado. A vida
continuará interminavelmente
surpreendente.

Tudo é crescimento.

RESUMO

Este trabalho estuda o Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos- MeDiNa com o objetivo de avaliar o projeto da duplicação da rodovia AL-145. Essa nova proposta de cálculo de pavimentos asfálticos visa substituir o atual método empírico - processo usado no projeto em avaliação - por um método mecanístico empírico. Inicialmente são apresentados os processos relacionados ao dimensionamento pelo método empírico atualmente utilizado. Em sequência, é feita uma abordagem detalhada do MeDiNa tratando dos conceitos fundamentais que governam sua metodologia mecanística empírica, os danos que acometem a estrutura do pavimento e o processo de modelagem das propriedades mecânicas dos materiais e dos modelos de desempenho do pavimento à fadiga e deformação permanente. A caracterização dos materiais necessários à aplicação do MeDiNa no estudo de caso foram obtidas através de bibliografia especializada. Os resultados apontaram que a estrutura do pavimento está em conformidade com os limites de danos máximos admitidos pelo MeDiNa, indicando ainda que a estrutura pode contar com espessuras mais delgadas. Essa oportunidade de otimização também foi traduzida em termos pecuniários. O programa MeDiNa mostrou-se versátil na proposta de avaliar analiticamente a solicitação do tráfego e o comportamento estrutural do pavimento que por fim promove confiabilidade na estimativa da vida útil da rodovia.

Palavras-chaves: Pavimentação; Dimensionamento; Mecânica; MeDiNA.

ABSTRACT

This paper studies the National Method of Sizing of Pavements - MeDiNa- with the objective of evaluating the duplication project of the highway AL-145. This new proposal of pavement calculation aims to replace the current empirical method - process used in the project in evaluation- for a mechanically empirical. Initially, there are presented the processes related to the dimensioning by the empirical method currently used. In sequence, a detailed approach is made to MeDiNa, addressing the fundamental processes that govern its mechanically empirical purpose, the damages that occur in a pavement structure and the process of modeling the mechanical properties of the materials and the performance models of the pavement in fatigue and permanent deformation. The characterization of the necessary materials to the application of MeDiNa in the case study was obtained through the specialized bibliography. The results indicated that the pavement structure complies with the maximum information limits allowed by MeDiNa, while still referring to a structure with the thinnest densities. This opportunity for optimization has also been translated into pecuniary terms. The MeDiNa program proved to be versatile in analytically analyzing a solicitation for traffic and the structural behavior of the pavement being promoted in the plan of the life of the highway.

Key-words: Paving; Sizing; Mechanics; MeDiNA.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1- ESQUEMA DE SEÇÃO TÍPICA DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL	17
FIGURA 2.2- ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO	18
FIGURA 3.1 - CURVAS DE FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE OPERAÇÃO.....	24
FIGURA 3.2 - ESQUEMA DAS CAMADAS PARA DIMENSIONAMENTO DNER	25
FIGURA 3.3- ÁBACO DE DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DNER	27
FIGURA 4.1- TELA DO PROGRAMA MEDiNA	30
FIGURA 4.2- FLUXOGRAMA DE DIMENSIONAMENTO ME.....	31
FIGURA 4.3- FLUXOGRAMA DO MEPDG.....	32
FIGURA 4.4- ESQUEMA DE MODELAGEM DA TEORIA DA ELASTICIDADE NO INTERIOR DO PAVIMENTO ASFÁLTICO ..	34
FIGURA 4.5- TELA DA SUB ROTINA EAMC.....	34
FIGURA 4.6- CURVAS COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS.....	35
FIGURA 4.7 - EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	37
FIGURA 4.8- DIAGRAMA DE ORIENTAÇÃO ESPACIAL USADO NO MEDiNA.....	37
FIGURA 4.9- COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO SUJEITOS A UM CICLO DE CARREGAMENTO ..	38
FIGURA 4.10- EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CARGAS REPETIDAS.....	39
FIGURA 4.11 - APARELHAGEM PARA DETERMINAÇÃO DO MR DOS SOLOS – ESQUEMA DO EQUIPAMENTO TRIAXIAL DE CARGA REPETIDA.	44
FIGURA 4.12- PAVIMENTO COM DANO RUPTURA ESTRUTURAL E RUPTURA FUNCIONAL	45
FIGURA 4.13- FADIGA DO REVESTIMENTO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	46
FIGURA 4.14 - ESQUEMA PARA QUANTIFICAR A ÁREA TRINCADA NO PAVIMENTO	47
FIGURA 4.15 - CURVA DE FADIGA DE MISTURA ASFÁLTICA	48
FIGURA 4.16 – CURVA DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	49
FIGURA 4.17- REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS ONDE OS DANOS SÃO AVALIADOS NA CAMADA DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO.....	50
FIGURA 4.18 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DA FUNÇÃO DE DESLOCAMENTO	51
FIGURA 4.19 - ESQUEMA DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	52
FIGURA 4.20 - ESQUEMA DE MONTAGEM DO ENSAIO DE FLOW NUMBER (FN).....	53
FIGURA 4.21 - CURVA TÍPICA DO ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA: DEFORMAÇÃO PLÁSTICA VERTICAL UNIAXIAL ACUMULADA VERSUS NÚMERO DE CICLOS.....	53
FIGURA 4.22- PONTOS DE ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE NO INTERIOR DO PAVIMENTO.	56
FIGURA 5.1 – LOCALIZAÇÃO DA RODOVIA	59
FIGURA 5.2 - TELA DO MEDiNA COM ESTRUTURA IMPLEMENTADA.....	65
FIGURA 5.3 - GRÁFICO EVOLUÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE.	66
FIGURA 5.4- GRÁFICO EVOLUÇÃO DA ÁREA TRINCADA.	66
FIGURA 5.5 - DIAGRAMA DE TENSÕES VERTICAIS NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO -Z=0.	67
FIGURA 5.6 - DIAGRAMA DE TENSÕES VERTICAIS NA SUPERFÍCIE INFERIR DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO-Z=5CM.68	68
FIGURA 5.7 - DIAGRAMA DE TENSÕES VERTICAIS NO MEIO DA CAMADA DE BASE - Z=15CM.....	68

FIGURA 5.8 - DIAGRAMA DE TENSÕES VERTICAIS NO MEIO DA CAMADA DE SUB-BASE -Z=32,5CM.	68
FIGURA 5.9 - DIAGRAMA DE TENSÕES VERTICAIS NA SUPERFÍCIE DO SUBLEITO - Z=40CM.....	69
FIGURA 5.10- DIAGRAMA DE TENSÕES VERTICAIS, PLANO Y=0	69
FIGURA 5.11- DIAGRAMA DE DEFORMAÇÕES ELÁSTICAS VERTICAIS ESPECÍFICAS, PLANO Y=0.....	69
FIGURA 5.12- GRÁFICO EVOLUÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	71
FIGURA 5.13- GRÁFICO EVOLUÇÃO DA ÁREA TRINCADA.....	71

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1– CONDIÇÕES E RESTRIÇÕES GERAIS PARA O DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO	22
TABELA 3.2- RECOMENDAÇÕES DE PERCENTUAL DE VEÍCULOS NA FAIXA DE PROJETO	25
TABELA 3.3- COEFICIENTE DE EQUIVALÊNCIA ESTRUTURAL	26
TABELA 3.4 – ESPESSURA MÍNIMA DE REVESTIMENTO BETUMINOSO	28
TABELA 4.1- ESTIMATIVAS DE MR PARA DIVERSOS MATERIAIS	40
TABELA 4.2- VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTE DE POISSON	41
TABELA 4.3 – FLOW NUMBER PARA CADA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO DO EIXO PADRÃO	54
TABELA 4.4 – PARÂMETROS DO MODELO DE PREVISÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE	56
TABELA 4.5– CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DO MeDiNA	58
TABELA 5.1 – CONTAGEM DE TRÁFEGO DA RODOVIA	60
TABELA 5.2– RESULTADO DO NÚMERO DE OPERAÇÕES DO EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO.....	61
TABELA 5.3– COMPOSIÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA	62
TABELA 5.4 - ESTRUTURA DO PAVIMENTO, QUE CONSTA NO PROJETO BÁSICO, OBTIDA POR MEIO DO MÉTODO DNER	63
TABELA 5.5– PROPRIEDADES MECANICISTAS EMPÍRICAS DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO	64
TABELA 5.6– PROPRIEDADES MECANICISTAS EMPÍRICAS DA CAMADA DE BASE.	64
TABELA 5.7– PROPRIEDADES MECANICISTAS EMPÍRICAS DA CAMADA DE SUB-BASE.	64
TABELA 5.8– PROPRIEDADES MECANICISTAS EMPÍRICAS DO SUBLEITO.	65
TABELA 5.9 – DEFORMAÇÃO PERMANENTE	67
TABELA 5.10- OTIMIZAÇÃO DA ESTRUTURA COM O MeDiNA.....	72
TABELA 5.11- REDUÇÃO DAS CAMADAS DE SOLOS	72
TABELA 5.12- CUSTO DOS MATÉRIAS DE BASE E SUB-BASE.....	73
TABELA 5.13-RESULTADOS DA AVALIAÇÃO MONETÁRIA.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AEMC	Módulo de Cálculo de Tensões e Deformações
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CBR _{SL}	CBR de Subleito
CBR _{Ref}	CBR de Reforço de Subleito
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FN	Flow Number
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ME	Mecanístico Empírico
MeDiNa	Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos
MTCO ₂	Tonelada Métrica de Dióxido de Carbono
MR	Módulo de Resiliência
TCU	Tribunal de Contas da União
N	Número de Passagens do Eixo Padrão Rodoviário

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos	14
1.2. Justificativa.....	15
2. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	17
2.1. Estrutura do Pavimento Asfáltico	17
3. MÉTODO EMPÍRICO DO DNIT	21
3.1. Resistência dos Materiais	21
3.2. Análise do Tráfego	22
3.3. Dimensionamento.....	25
3.4. Considerações sobre o Método Empírico.....	28
4. NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	29
4.1. Apresentação do Programa.....	29
4.2. Metodologia Mecanística Empírico – Visão Geral	30
4.3. Teoria do Comportamento Estrutural dos Pavimentos Asfálticos	33
4.4. Carregamento da Estrutura.....	36
4.5. Propriedades dos Materiais de Pavimentação	37
4.5.1. Materiais Asfálticos	38
4.5.2. Materiais de Solos.....	41
4.6. Modelos de Desempenho dos Pavimentos Asfálticos.....	44
4.6.1. Fadiga do Revestimento Asfáltico.....	46
4.6.2. Deformação Permanente.....	52
4.7. Tipos de vias, Limites de Danos e Confiabilidade.....	57
5. AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO DA DUPLICAÇÃO PELO MEDINA	59
5.1. Apresentação do Projeto Básico de Pavimentação	60

5.1.1. Tráfego.....	60
5.1.2. Materiais de Pavimentação	61
5.2. Análise do Projeto de Pavimentação com o MeDiNa	63
5.2.1. Classificação da rodovia	63
5.2.2. Caracterização do Tráfego	63
5.2.3. Caracterização dos materiais	63
5.2.4. Análise dos resultados	65
5.3. Considerações adicionais	70
5.3.1. Avaliação de vida de serviço máxima	70
5.3.2. Redimensionamento da estrutura do pavimento.....	71
5.3.3. Avaliação econômica dos resultados	72
6. CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS	75

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da engenharia é marcado pela perseguição do entendimento do comportamento das estruturas. O seu avanço depende disso. Trazendo para o mundo da pavimentação, o desafio está em conceber modelos que representem com proximidade a realidade de campo do pavimento nas condições impostas pelas solicitações dos veículos, seus efeitos nos materiais e em sua estrutura global. O objetivo com tudo isso é a eficiência. Modelos adequados levam ao desenvolvimento de estruturas otimizadas, com comportamento previsível ao longo de sua vida de serviço.

O método de dimensionamento de pavimentos asfálticos vigente é baseado em métodos empíricos fruto de experimentos e observações feitas ainda na década de 60. Esse método tem limitações e possíveis falhas na representação do comportamento do pavimento asfáltico, sobretudo por que só poderia ser aplicado adequadamente nos locais com condições climáticas semelhantes ao ambiente onde o método foi desenvolvido. O método sofre ainda de desatualização, visto que as características dos veículos mudaram nos últimos 50 anos- tipo do eixo, pressão de enchimento dos pneus e cargas transportadas (PELISSON N., JÚNIOR J., JÚNIOR C., FONTENELE H., 2016).

Em solução, nos últimos anos têm-se desenvolvidos os métodos Mecanísticos-Empíricos, doravante ME. São métodos que se valem de conceitos da mecânica para desenvolver modelos teóricos sobre o comportamento estrutural do pavimento. O comportamento dos materiais constituintes é parametrizado por meio de conhecimento empírico, laboratorial ou de pista, e essa é a quantia empírica do método (BALBO, 2007).

Na abordagem ME, a partir de uma estrutura pré-dimensionada é feita uma avaliação na relação tensão-deformação que ocorre nas estruturas do pavimento causadas pelas cargas do tráfego. Essas respostas estruturais são determinadas com o auxílio de recursos computacionais. Adicionando as informações dos materiais, são calculados os danos acumulados na vida de serviço da via. Isso oportuna a comparação do desempenho do pavimento frente aos critérios necessários para o bom uso da rodovia. Quando do não atendimento dos critérios de desempenho, varia-se os parâmetros do pavimento, como espessuras, matérias em suas propriedades (Poisson, Módulo de resiliência), até que se satisfaça uma estrutura ideal em termos econômicos, funcionais e de vida útil.

A construção de conhecimento sobre as análises mecânicas de tensões e deflexões, a caracterização física e mecânica detalhada dos materiais, o desenvolvimento de ensaios não

destrutivos dos pavimentos, a utilização de ensaios com tráfegos acelerados e o acúmulo de experiências durante décadas nas práticas de construção de rodovias- são os principais fatores que agora viabilizam o desenvolvimento da metodologia ME (MONISMITH,2004).

Diante disso, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes-DNIT especificamente sua divisão de pesquisas, Instituto de Pesquisas Rodoviárias- IPR, tem trabalhado desde de 2015 para a efetiva elaboração de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos denominado Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MEDINA, 2018). Atualmente o trabalho está na etapa final. Normas e o programa de computador MeDiNa, principal ferramenta para o novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos do DNIT, foram colocadas a público e estão em fase de teste.

Para apreciar essa nova proposta de método de dimensionamento de pavimentos asfálticos do DNIT e comparar com o método empírico, esse trabalho se propõe a fazer uma avaliação do projeto de melhoramento e restauração do segmento da rodovia, entre a BR 423 / Delmiro Gouveia e a AL-220. Seu projeto de pavimentação foi concebido pelo Método Empírico do DNIT (Método DNER) e no presente trabalho será avaliado e reprojetoado, usufruindo do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos-MeDiNa.

1.1. Objetivos

❖ Objetivo Geral

Avaliar o pavimento da duplicação da AL-145 sob os critérios de dimensionamento do Novo Método de Dimensionamento Mecanístico Empírico de Pavimentos Asfálticos - MeDiNa.

❖ Objetivos Secundários

- Apresentar o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos -MeDiNa;
- Realizar comparação entre as metodologias de dimensionamento de pavimentos asfálticos;
- Verificar se o pavimento da duplicação da AL-145 dimensionada via Método Empírico atende aos critérios de desempenho do novo método do DNIT;
- Realizar avaliação orçamentária para execução dos serviços de pavimentação levando em consideração um possível subdimensionamento ou superdimensionamento da estrutura do pavimento.

1.2. Justificativa

Segundo a Pesquisa CNT de Rodovias 2017 elaborado pela Confederação Nacional do Transporte – CNT, 95% dos passageiros e 61% das cargas que trafegam no país usam o modal rodoviário. Esse protagonismo atrai para as rodovias os maiores investimentos públicos em infraestrutura de transporte. Contudo, seu estado parece indicar que esses investimentos são insuficientes e/ou ineficazes.

A Pesquisa CNT de Rodovias 2017, avaliou 105.814 Km de rodovias federais e estaduais pavimentadas em todo o país. Como resultado, foram identificados 52.911 Km (50,0% da extensão total avaliada) com problemas especificamente no pavimento da rodovia. Essas deformidades implicam em aumento nos custos de manutenção da frota, maior tempo de viagem e consumo adicional de combustível (832,3 milhões de litros de diesel adicionais no ano 2017, emissão adicional de 2,22 MtCO₂). Somados, isso eleva em média 27% do custo logístico brasileiro.

Um relatório de auditoria feito em 2013 pelo Tribunal de Contas da União-TCU que buscou avaliar a qualidade dos serviços executados em algumas rodovias recém-concluídas, sob a gestão do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), apontou que nove das onze rodovias avaliadas apresentavam algum defeito estrutural. Essas rodovias tinham em média apenas 7 meses de serviço, no entanto apresentavam deformações permanente, trincas e fissuras.

Costumeiramente, a péssima qualidade das rodovias do Brasil é atribuída ao excesso de carga dos caminhões, empregos de materiais inadequados e execução deficiente. No entanto, no caso das rodovias inspecionadas pelo TCU, a ação desses fatores não parece ser as únicas causadas (VIEIRA A., FRANCO F., SILVA C., 2016). É pouco provável que em tão pouco tempo o excesso de carga seja o responsável, visto que essas rodovias são projetadas para durar 10 anos e o problema de excesso de cargas é altamente previsível. Quanto aos materiais (ligantes, agregados, aditivos, etc), como são industrializados, tem um forte apelo de controle de qualidade. Responsabilizar a execução e admitir que todas as construtoras contratadas se esmeraram em fazer um péssimo trabalho também parece pouco razoável. Por conjecturas como essas, vários autores têm trabalhado em descobrir os vários fatores que acometem o pavimento precocemente.

Em 2017 a CNT publicou um estudo que tentava responder a seguinte indagação, “Por que os pavimentos das rodovias brasileiras não duram?”. A pesquisa ouviu especialistas da área

de pavimentação, o DNIT e concessionárias de rodovias tentando encontrar as principais causas de defeitos e possíveis oportunidades que levem a melhorias na qualidade dos pavimentos das rodovias brasileiras. Pontos de problemas costumeiros no mundo da construção civil foram levantados, como processo construtivo, gerenciamento e fiscalização. O que chama atenção, com seu caráter menos típico dos problemas de engenharia, é apontar o método de dimensionamento como fonte de defeito. Para as autoridades da pavimentação é imperativo que o método de dimensionamento, até então empírico, seja revisto e substituído pelos métodos mecanicistas- empírico.

Dimensionar um pavimento é determinar as espessuras das camadas que irão constituir a estrutura do pavimento a partir da escolha de materiais apropriados para cada uma das camadas e de critérios de ruptura estabelecidos nos modelos de análise (FRTZEN, 2016).

Parece então pertinente uma discussão em torno da engenharia dos pavimentos asfálticos, buscando entender que elementos governam seu comportamento, confrontando os métodos de dimensionamento e, ainda, apreciar a potencial versatilidade do método mecanicista-empírico frente ao método DNER.

Dessa forma, buscando analisar um projeto real, se tornou oportuna à escolha da rodovia AL-145 para avaliação, pois a execução da duplicação da mesma, a qual fica situada às margens da Universidade Federal de Alagoas – UFAL/Campus do Sertão, está sendo executada de forma simultânea ao desenvolvimento deste trabalho, facilitando a apreciação do objeto de estudo. As avaliações de custo que serão aqui apresentadas servem para exemplificar como diferentes modelos e técnicas de dimensionamento de pavimentos podem se traduzir em orçamentos consideravelmente distintos para uma mesma rodovia. As conclusões quanto a avaliação da vida de serviço da duplicação pelo MeDiNa também são atraentes e somam na justificativa desse trabalho. Uma rodovia é construída a custos públicos, merece atenção a todas as oportunidades que possam tornar a obra mais atrativa economicamente.

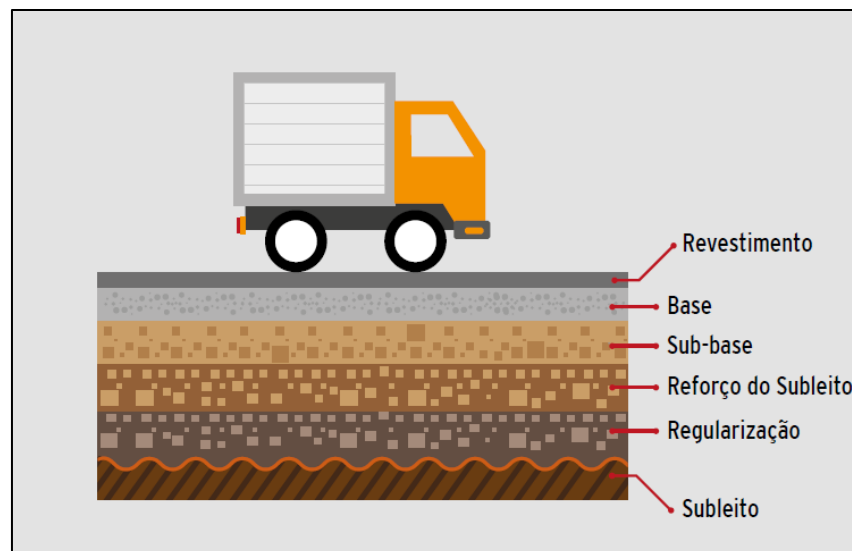
2. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O pavimento é uma estrutura composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do terreno natural. Sua função é atender estruturalmente e operacionalmente ao tráfego de maneira durável e ao mínimo de custos possíveis, considerando no seu horizonte de serviço a manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação.

Seu trabalho estrutural se dá em receber e transmitir esforços de modo a atenuar as pressões às camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes. Para que a estrutura trabalhe satisfatoriamente todos os elementos constituintes precisam ser solicitados dentro de suas capacidades. Isso impede que aja deformações ou mesmo rupturas incompatíveis que levem o pavimento à ruína prematura (BALBO, 2007).

Uma seção transversal típica do pavimento, Figura (2.1), é composta por subleito, reforço de subleito, Sub-base, Base e Revestimento.

Figura 2.1- Esquema de seção típica de um pavimento flexível

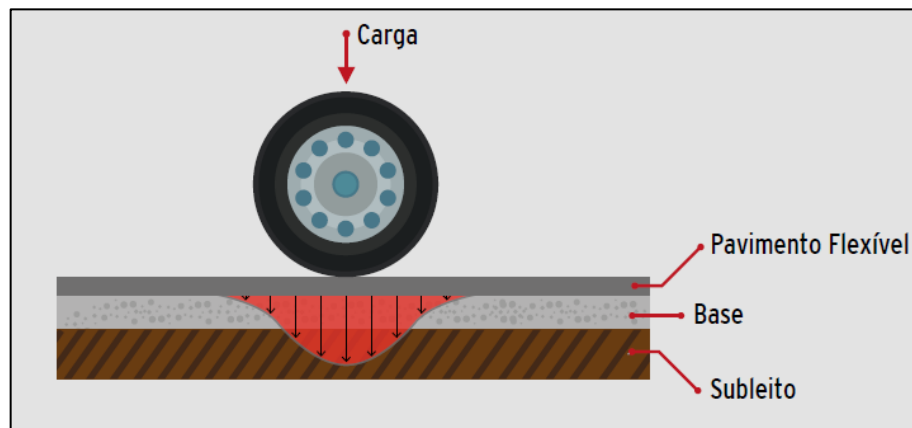


Fonte: CNT (2016).

2.1. Estrutura do Pavimento Asfáltico

A principal característica dos pavimentos flexíveis é a sua deformação elástica significativa. A carga decorrente do tráfego se distribui de forma aproximadamente equivalente entre as camadas, o que gera um campo de tensões concentrado nas proximidades do ponto de aplicação da carga e conseqüentemente baixa dissipação dos esforços. Por isso as camadas do pavimento são mais espessas a fim de proteger o subleito do pavimento (BALBO, 2007).

Figura 2.2- Esquema de distribuição de tensões de um pavimento asfáltico



Fonte: CNT (2016)

Balbo (2007) estabelece as seguintes definições para as camadas do pavimento:

- Subleito

O subleito é o terreno natural de fundação em que é apoiado o pavimento. É responsável por absorver definitivamente os esforços verticais causados pelo tráfego, por isso precisa ser consolidado e compactado. O subleito precisa ser conhecido até a profundidade onde as cargas impostas pelo tráfego são significativas, normalmente no primeiro metro. Acima do subleito é encontrada a Regularização, ou seja, uma faixa de nivelamento do subleito, construída sobre ele com o objetivo de conformá-lo transversal e longitudinalmente. Não constitui uma camada do pavimento propriamente dita.

- Reforço de subleito

É uma camada de espessura transversalmente constante, que, quando se faz necessária, é construída acima do subleito regularizado. Sua espessura longitudinal é variável de acordo com o dimensionamento do pavimento. É parte integrante do pavimento e complementa a sub-base. Dessa forma, o reforço do subleito tem a função de resistir e distribuir esforços verticais provenientes da ação do tráfego.

Geralmente, é executado no caso de estruturas espessas, devido à fundação de baixa qualidade ou ao tráfego de cargas muito pesadas, ou, ainda, uma combinação desses fatores. Em qualquer caso, o material utilizado nessa camada deve atender a condições mínimas de qualidade, possuindo características técnicas superiores ao material do subleito e inferiores ao material que vier na camada superior.

- Sub-base

É a camada complementar à base executada por circunstâncias técnico-econômicas, quando a camada da base exigida for muito espessa. Exerce função de complemento da base, portanto tem a função de resistir e distribuir os esforços verticais provenientes da ação do tráfego. Além disso, quando necessário, tem a função de drenar infiltrações e controlar a ascensão capilar da água. O material empregado na constituição da sub-base deve ter características tecnológicas superiores às do material de reforço e inferiores às do material da base (camada superior). Podem ser constituídas por solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concreto, entre outros.

- Base

É a camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos do tráfego. É sobre a base que é construído o revestimento. Alguns autores constatam que, na realidade, pode-se considerar que o pavimento é composto apenas de base e revestimento, sendo que, em alguns casos, a base poderá ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito.

A capacidade estrutural da base está relacionada às propriedades de resistência e rigidez dos materiais empregados em sua constituição, que podem ser os mesmos listados para a sub-base, mas de melhor qualidade (características tecnológicas superiores). Entre as camadas do pavimento, em muitos casos, se faz necessária a execução da imprimação ou da pintura de ligação. Ambas consistem na aplicação de uma camada fina de material asfáltico sobre a superfície.

A imprimação (ou imprimadura) serve para aumentar a coesão da superfície, fixar as partículas eventualmente soltas e impermeabilizar a camada antes da execução da camada superior. Geralmente é executada entre a base e a camada asfáltica a ser sobreposta (revestimento), podendo em alguns casos ser executada sobre a camada de sub-base.

A pintura de ligação (ou imprimadura ligante) tem a função de promover aderência entre as camadas. É executada sobre a superfície de uma camada asfáltica nova ou antiga, no caso de reforço ou recapeamento. Também pode ser executada sobre camadas não asfálticas impermeáveis. Os dois processos são muito semelhantes e se diferem mais em função das condições das camadas subjacentes do que dos materiais empregados nas pinturas. Além disso, no caso da imprimação, ocorre penetração do material na camada, enquanto na pintura de ligação, isso não ocorre.

- Revestimento

É a camada que recebe diretamente a ação do tráfego. Tem o objetivo de melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e à segurança e deve ter capacidade de resistir aos desgastes, a fim de aumentar a durabilidade do pavimento. Também deve ser, tanto quanto possível, impermeável.

O CBUQ é o mais nobre dos revestimentos flexíveis. É uma mistura de agregados feita em usina seguindo rigorosas especificações. A execução desse revestimento é o serviço que requer mais acurado controle dentre os que compõem as etapas de pavimentação. A aplicação do CBUQ é feita por uma vibroacabadora, máquina que promove o espalhamento da massa na espessura e largura desejada e executa parte do trabalho de compactação. Imediatamente após a distribuição da massa, inicia-se a operação de rolagem para compactação final da camada.

3. MÉTODO EMPÍRICO DO DNIT

O Método Empírico do DNIT (Método DNER) foi desenvolvido pelo Eng^o Murillo Lopes de Souza, baseado no método CBR. O método CBR foi criado no final de 1920 pela Divisão de Rodovias da Califórnia. Seu desenvolvimento teve início em estudos que objetivaram discriminar os fatores que levavam a ruptura do pavimento nas rodovias da Califórnia. As principais causas encontradas foram a má compactação, o excesso de umidade no subleito, as espessuras de base insuficientes e as bases compostas por materiais com pouca resistência à tensão cisalhante. Mais tarde, no início da década de 1940 o corpo do Exército dos Estados Unidos impelidos pela necessidade de pistas melhores para suportar pousos e decolagens dos aviões da Segunda Guerra Mundial, aprimoraram o método (COUTINHO,2011).

Na condição de ter sido o primeiro método de dimensionamento, o método CBR foi criado sobre alicerces estritamente empíricos. Contudo, ele ainda é amplamente adotado em métodos variantes, tais como Método DNER adotado aqui no Brasil para cálculo da capacidade de suporte do subleito e dos materiais das demais camadas do pavimento. O método foi normatizado pelo DNER em 1966, desde então sua utilização passou a ser obrigatória em projeto de rodovias brasileiras. Inicialmente destinado apenas a pavimentos flexíveis, a adoção desse critério consolidou-se também no dimensionamento de pavimentos rígidos (CNT,2016).

3.1. Resistência dos Materiais

No Método DNER, a capacidade resistiva do subleito e dos demais materiais constituintes do pavimento é feita exclusivamente pelo CBR. Esse parâmetro, é resultado do ensaio de Índice Suporte Califórnia. O método de ensaio é preconizado pelo DNER, são usados corpos-de prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade específica para o serviço.

O Método Empírico do DNIT estabelece algumas condições quanto as características de suporte que cada camada deve apresentar, tabela (3.1).

Tabela 3.1– Condições e restrições gerais para o dimensionamento do pavimento

Camada	Condições e restrições
Materiais do subleito	Devem apresentar uma expansão máxima, medida no ensaio CBR de 2%, e um CBR $\geq 2\%$
Materiais para reforço do subleito	Devem apresentar CBR maior que o do subleito e expansão $\leq 1\%$.
Materiais para sub-base	Devem apresentar CBR $\geq 20\%$, Índice de Grupo (IG) = 0 e expansão $\leq 1\%$.
Materiais para base	Devem apresentar CBR $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$, Limite de Liquidez (LL) $\leq 25\%$ e Índice de Plasticidade (IP) $\leq 6\%$.

Fonte: DNIT (2006)

O método estabelece outras condições mais específicas quanto as características dos materiais empregados, como faixas granulométricas, tipos de solos e ainda considerações relativas a permissão de uso de CBR menores aos mostrados na tabela (3.1).

3.2. Análise do Tráfego

O tráfego rodoviário é um parâmetro complexo de ser avaliado. São diversos tipos de veículos, diversas configurações de pneus com distintas cargas transportadas. A sua modelagem requer a contagem de veículos, distribuição do peso sobre os eixos, velocidade de passagem, variação lateral em relação ao eixo da rodovia, geometria dos eixos, pressão dos pneus (FRANCO, 2007). A previsão do crescimento do tráfego, e a sua variação ao longo do ano também são fatores primordiais à avaliação, visto que o horizonte de projeto de um pavimento é de no mínimo 10 anos.

Para avaliar o tráfego, o Método Empírico do DNIT expressa as solicitações do tráfego esperados no horizonte de projeto P, em termos do Número equivalente N. As várias operações dos diversos tipos eixos de veículos são todas transformadas em operações equivalentes a um eixo padrão com carga de 8,2t. Desse modo os veículos são matematicamente padronizados, mas fisicamente é mantido o mesmo valor destrutivo das solicitações do tráfego.

O número N é calculado pela expressão (3.1), sendo função direta de três variáveis principais: o volume total de veículos em todo período de projeto (V_t), o fator de veículos (F_v) e o fator climático regional (F_R).

$$N = V_t \cdot F_v \cdot F_R \quad (3.1)$$

O volume total de veículos V_t é obtido com a equação (3.2). Onde P é o período de projeto. Essa expressão é usada quando a taxa de crescimento anual (t) da frota se der em padrão aritmético.

$$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m \quad (3.2)$$

V_m é o volume diário médio de tráfego do ano médio de análise:

$$V_m = \frac{V_1 \left(2 + \frac{(P-1) \cdot t}{100} \right)}{2} \quad (3.3)$$

Onde, V_1 é o volume médio diário de tráfego no ano da abertura.

Quando do crescimento da frota de veículos for avaliado por padrão geométrico V_t é determinado pela expressão:

$$V_t = \frac{365 \cdot V_1 \cdot [(1+t/100)^P - 1]}{t/100} \quad (3.4)$$

Para o cálculo do fator de veículos F_v , faz-se necessária a transformação de todas as cargas dos diferentes tipos de veículos em cargas que sejam equivalentes, em poder destrutivo, à carga do eixo padrão. O fator de veículos é função de dois fatores, o fator de eixos e o fator de carga, conforme a expressão (3.5).

$$F_v = F_e \cdot F_c \quad (3.5)$$

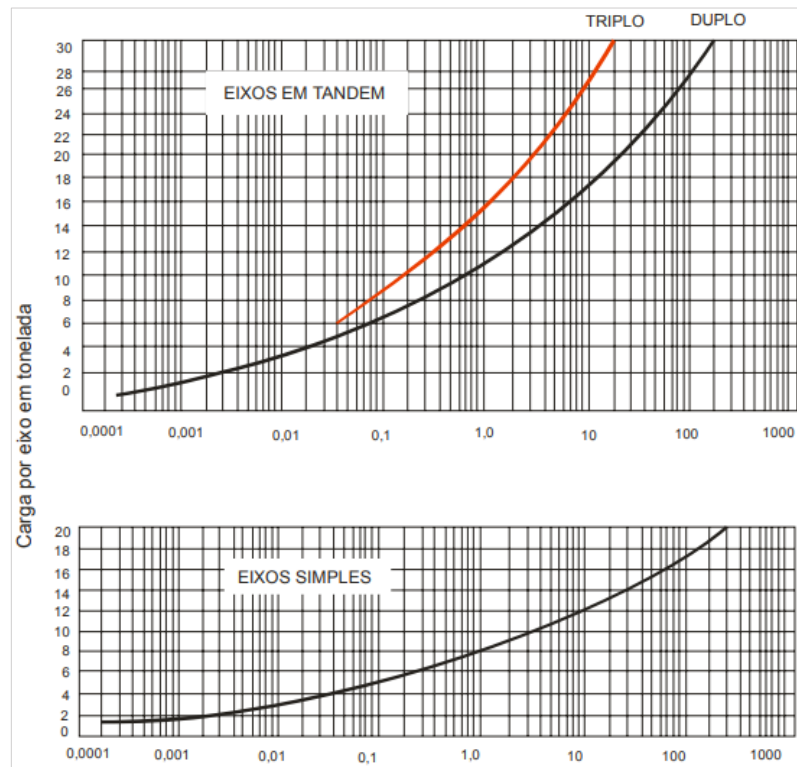
Onde:

F_e é o fator de eixos: um número que, multiplicado pelo número de veículos, fornece o número de eixos correspondentes;

F_c é o fator de carga: um número que, multiplicado pelo número de eixos que operam, fornece o número de eixos equivalentes ao eixo padrão, isto é, transforma o poder de dano dos eixos dos vários tipos de veículos que compõem o tráfego em dano equivalente ao eixo padrão

Os valores dos fatores de equivalência de carga podem ser obtidos por meio de gráficos, como o apresentado na Figura (3.1).

Figura 3.1 - Curvas de Fatores de equivalência de operação.



Fonte: DNIT (2006)

O fator de eixos pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$FE = \frac{n}{V_t} \quad (3.6)$$

Onde:

n- número total de eixos;

V_t é o volume total de veículos.

O fator de carga é expresso por:

$$FC = \frac{\sum P_j \cdot FC_j}{100} \quad (3.7)$$

P_j – Porcentagem de incidência que cada categoria de veículo ‘j’ ocorre na estrada obtido por meio da contagem dos veículos;

FC_j – é o fator de equivalência de operação para cada categoria de veículo “j” que é determinado com o gráfico da figura (3.1).

As considerações climáticas, relacionadas a possíveis variações na umidade dos materiais do pavimento o que pode implicar variações na capacidade de suporte dos materiais,

são incorporadas por meio de um coeficiente denominado Fator Regional (FR). Esse coeficiente é uma média ponderada dos diferentes coeficientes sazonais, levando-se em conta o espaço de tempo em que ocorrem. Pesquisas no IPR/DNER indicam o uso de $FR=1$. Esse coeficiente deve multiplicar o número de operações do eixo padrão, N . Desse modo, o fator climático no método DNER não influi sobre o dimensionamento.

Quando de rodovias com mais de um faixa num sentido é preciso considerar a distribuição dos veículos entre elas. Segundo Franco (2009) para vias de duas faixas, a maioria dos veículos mais pesados trafega pela faixa da direita, para vias com mais de três faixas, a distribuição da passagem dos veículos mais pesados é mais complexa. O método de dimensionamento do DNER considera o tráfego da faixa mais solicitada como o tráfego para efeito de projeto. A tabela (3.2) indica os percentuais de veículos na faixa de projeto.

Tabela 3.2- Recomendações de percentual de veículos na faixa de projeto

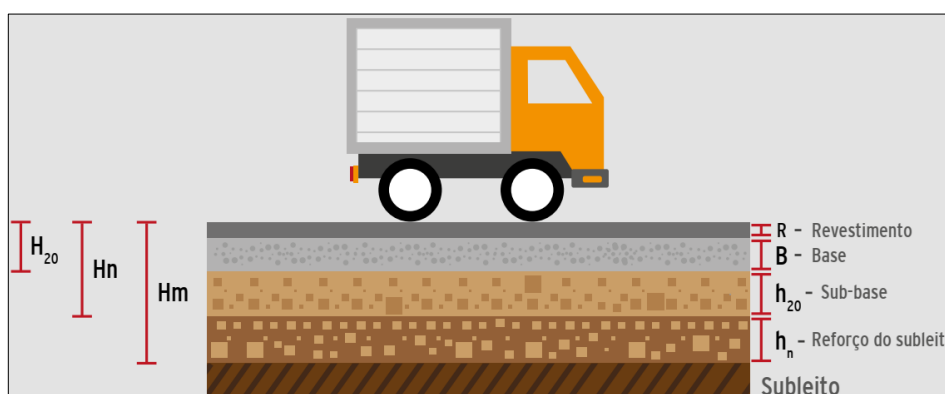
Número de faixas de tráfego (2 sentidos)	Veículos na faixa de Projeto (%)
2	50
4	35 a 48
6 ou mais	25 a 48

Fonte: Souza (1981)

3.3. Dimensionamento

As espessuras das camadas do pavimento são representadas pelas siglas ilustradas na figura (3.2).

Figura 3.2 - Esquema das camadas para dimensionamento DNER



Fonte: DNIT (2016)

Onde:

R – Espessura da camada de revestimento;

B – Espessura da camada de Base;

h_{20} – Espessura da camada de sub-base;

h_n – Espessura da camada de reforço do subleito;

H_{20} – Espessura do pavimento sobre a sub-base;

H_n – Espessura do pavimento sobre o reforço do subleito ;

H_m – Representa a espessura e sobre o subleito.

O Primeiro passo na definição das espessuras das camadas é o estabelecimento dos coeficientes de equivalência estrutural tabela (3.3). O Coeficiente de Equivalência representa a comparação entre a espessura necessária da camada feita com o material padrão (base granular) com a espessura equivalente da camada que irá constituir o pavimento de fato.

Tabela 3.3- Coeficiente de equivalência estrutural

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

Fonte: DNIT (2006)

Os coeficientes estruturais são designados, genericamente por:

- Revestimento: K_R ;
- Base: K_B ;
- Sub-base: K_S ;
- Reforço: K_{Ref} .

O cálculo das espessuras de cada camada é feito a partir das seguintes inequações:

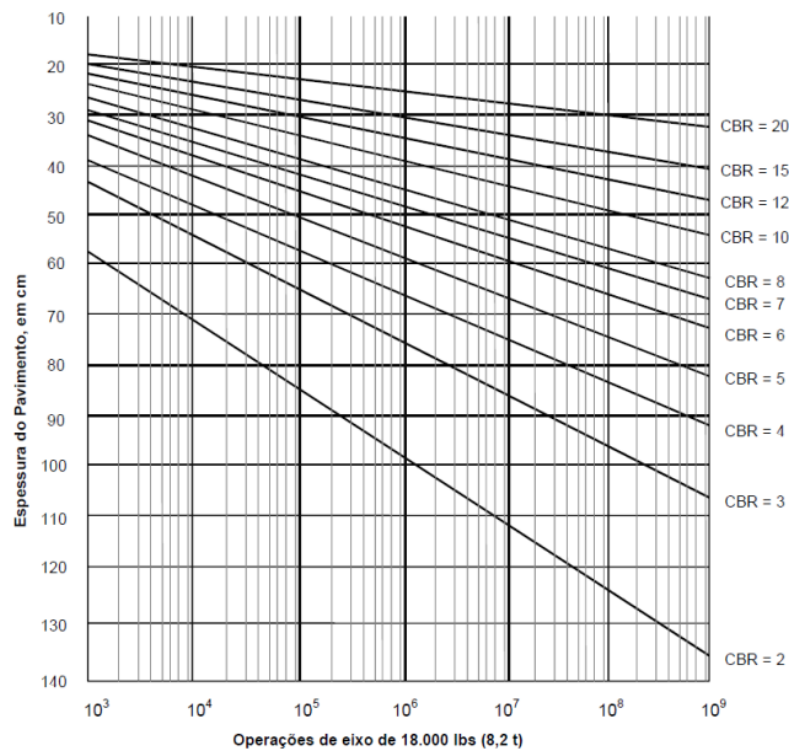
$$(R \cdot K_R) + (B \cdot K_B) \geq H_{20} \quad (3.8)$$

$$(R \cdot K_R) + (B \cdot K_B) + (h_{20} \cdot K_S) \geq H_n \quad (3.9)$$

$$(R \cdot K_R) + (B \cdot K_B) + (h_{20} \cdot K_S) + (h_n \cdot K_{Ref}) \geq H_m \quad (3.10)$$

As espessuras H_{20} , h_n e H_m são calculadas por meio do ábaco representado pela Figura (3.3). Para sua utilização, considera-se o CBR da sub-base, do reforço do subleito e do subleito, respectivamente, o coeficiente de equivalência em termos de pedra britada ($K=1,00$) e o valor de N projetado.

Figura 3.3- Ábaco de dimensionamento pelo Método DNER



Fonte: DNIT (2006)

Alternativamente ao ábaco pode-se usar a expressão:

$$H_t = 77,67 \cdot N \cdot CBR^{-0,598} \quad (3.11)$$

O método fixa ainda valores mínimos de espessura de revestimento

Tabela 3.4 – Espessura mínima de revestimento betuminoso

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

Fonte: DNIT (2006)

3.4. Considerações sobre o Método Empírico

Segundo o próprio DNIT (2006), o método de dimensionamento Empírico, se volta para a proteção do subleito contra a geração de deformações plásticas excessivas durante o período de projeto e tem se mostrado eficaz, haja visto a rara ocorrência de afundamentos em trilha de roda, significativos nos pavimentos dimensionados por esse método.

Pode-se até mesmo falar em um superdimensionamento, que seria explicado pela ausência, no Brasil, da condição crítica correspondente ao degelo da primavera que acontece nos EUA. Contudo, esses métodos devem ser completados por análises que permitam considerar, no dimensionamento, o problema do trincamento por fadiga das camadas asfálticas, nos pavimentos flexíveis, e das camadas cimentadas, nos pavimentos semi-rígidos. O DNIT destaca ainda a incapacidade do método empírico em otimizar a estrutura no seu dimensionamento, que poderia ser feita tomando-se partido da capacidade de cada camada em resistir aos processos de deterioração provocados pelas cargas do tráfego.

4. NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos-MeDiNa é produto de uma pesquisa desenvolvida entre 2015 e 2018 pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE com a colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás - CENPES e de diversas Universidades do Brasil. O referido trabalho se intitula, *Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos* (IPR, 2018).

O objetivo do IPR com esse trabalho é desenvolver pesquisas, metodologias, e procedimentos, visando a implantação no DNIT de um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos, para realizar projetos de estruturas de pavimento mais adequadas às condições de solicitação do tráfego, proporcionando melhoria dos processos de avaliação dos projetos contratados e confiabilidade de estimativa da vida útil.

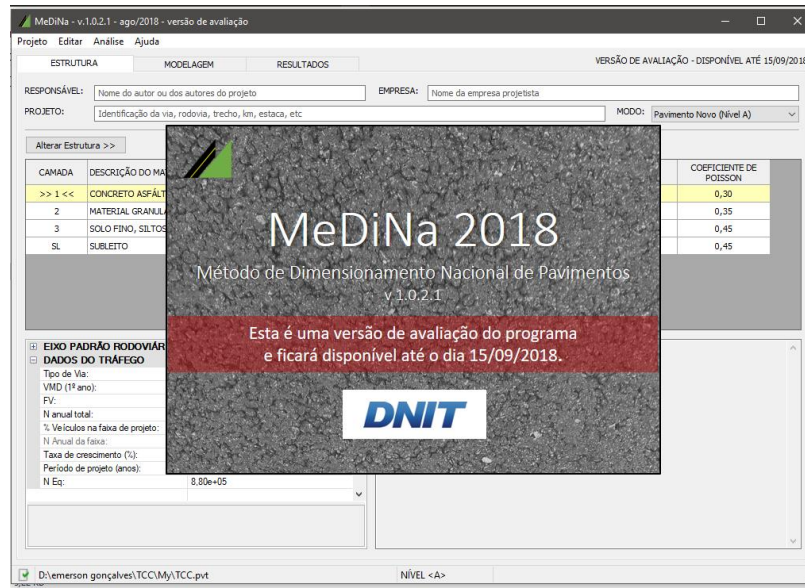
O IPR destaca os seguintes objetivos específicos para com a pesquisa:

- a) Análise crítica dos métodos existentes em vigor no IPR
- b) Análise crítica dos bancos de dados existentes no IPR e DNIT de interesse direto no escopo deste projeto
- c) Estabelecimento dos princípios do novo método de dimensionamento
- d) Elaboração de sistema de dimensionamento; ferramentas de análise de tensões e deformações e aplicação de critérios de ruptura ou equações de desempenho. (software MeDiNa)
- e) Estabelecimento de critérios de calibração das equações de desempenho.
- f) Elaboração de manuais e treinamentos.
- g) Implantação e acompanhamento das funcionalidades do sistema.
- h) Fechamento do projeto e entrega do “Método”.

4.1. Apresentação do Programa

O MeDiNa é uma ferramenta computacional de dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos dentro da metodologia mecanística empírica. A mesma vem na condição de elemento chave para a nova proposta de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNIT. O MeDiNa é uma atualização do programa SISPAV desenvolvido por Franco (2007) em sua tese de doutorado.

Figura 4.1- Tela do Programa MeDiNa



Fonte: MeDiNa (2018)

A assistência no dimensionamento da estrutura do pavimento é feita por rotinas que fazem o cálculo de tensões no interior das camadas dos pavimentos (AEMC), e modelos que avaliam o desempenho do pavimento.

É imperativo que para a boa avaliação ou dimensionamento estrutural de um pavimento o conjunto de informações de entrada sejam suficientemente precisos. As informações passam pelo conhecimento do subleito e das demais camadas constituintes do pavimento, isso é feito com ensaios laboratoriais. As informações referentes ao tráfego também precisam de acurácia suficiente.

A seguir será exposto toda a teoria da metodologia mecanicista empírica de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Será entendido todos os processos que o MeDiNa usa em seu funcionamento para o dimensionamento ou avaliação ordinária de um pavimento, e assim o conjunto de informações de entrada que o usuário projetista precisa reunir para o software.

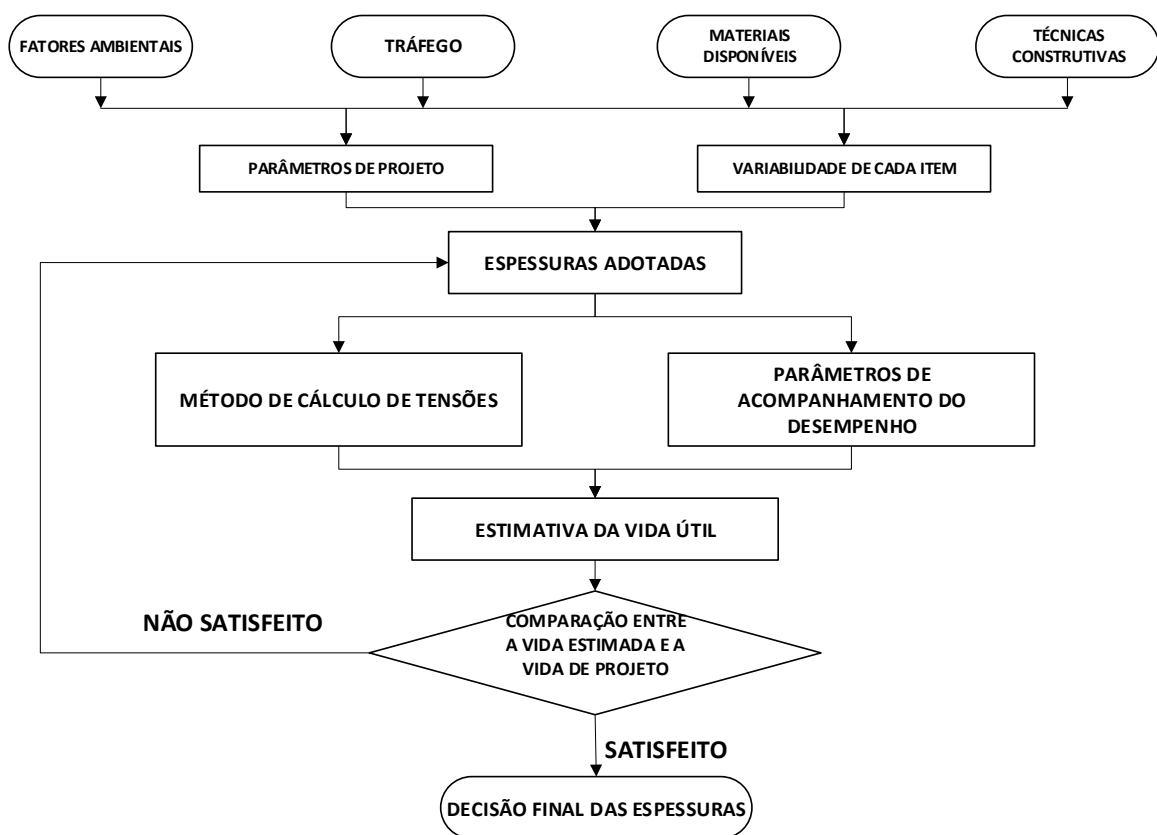
4.2. Metodologia Mecanística Empírico – Visão Geral

O conceito central do método de dimensionamento ME é o entendimento de que o pavimento, como qualquer outra estrutura de engenharia pode ter seu comportamento avaliado de forma analítica e a luz da teoria da mecânica das estruturas. Por consequência, solicitações, resistência dos materiais e todos os seus fatores intervenientes precisam ser equacionados.

A avaliação da estrutura é feita por meio do equilíbrio entre os esforços (tensões & deformações) que a ela são impostos pelas cargas de tráfego com sua repetição, e a capacidade resistente dos materiais que a constituem.

Para Motta e Medina (2005), o procedimento para qualquer método dito mecanístico empírico segue o fluxograma da figura (4.2). Possíveis diferenças ou variações no procedimento entre métodos ditos ME se dão na técnica utilizada para as análises de tensão–deformação, nos critérios de desempenho adotados (parte “empírica”), fatores campo-laboratório, entre outros.

Figura 4.2- Fluxograma de dimensionamento ME



Fonte: MOTTA, MEDINA (2005)

FRANCO (2007) resume o dimensionamento ME:

- Reunir os dados referentes aos materiais de pavimentação, ao tráfego e às condições ambientais;
- Correlacionar os dados de resistência dos materiais e tráfego em função das épocas sazonais e o comportamento dos materiais em função do tipo de carregamento;
- Escolher as espessuras das camadas e calcular as tensões e deformações considerando as diversas correlações obtidas;

- Relacionar os valores críticos de tensões e deformações com os danos que a repetição das cargas pode causar ao pavimento por meio de modelos de previsão; e
- Verificar se as espessuras escolhidas satisfazem as condições impostas no dimensionamento.

Nos Estados Unidos os pavimentos são dimensionados pelo *Mechanist-Empirical Pavement Design Guide - MEPDG* (Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos). O método foi desenvolvido em 2004 pela American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO.

A utilização desse método é auxiliada por um programa computacional com interface amigosa e orientada ao usuário, baseado nos procedimentos estabelecidos pelo guia. O fluxograma do seu processo MEPDG de dimensionamento é mostrado na figura (4.3), seu procedimento é dividido em três macroestágios.

Figura 4.3- Fluxograma do MEPDG



Fonte: CNT (2016)

No primeiro passo, chamado de Avaliação, consiste no levantamento e na identificação das entradas requeridas para análise. É avaliado o subleito, os materiais do pavimento e a composição do tráfego. O clima é avaliado por uma ferramenta que modela seus efeitos quanto à temperatura e umidade em cada camada do pavimento e no subsolo (o *software* inclui uma base de dados extensa para mais de 800 localidades nos EUA). Com o dimensionamento prévio

das camadas, é definido o sistema de drenagem e, por fim, feita uma avaliação quanto à efetividade do projeto do ponto de vista da engenharia e dos custos.

O estágio 2, designado Análise, faz uma abordagem interativa com o projeto simulado computacionalmente. Para isso, parte-se de uma estimativa inicial das espessuras das camadas, do conhecimento das características geométricas da pista, tráfego projetado, o coeficiente de Poisson, a elasticidade das camadas, e a interação entre elas, entre outras especificidades. A seção é analisada em função da resposta da interação entre as camadas e do aparecimento de defeitos ao longo do tempo, assim o resultado da análise é uma previsão dos danos acumulados no horizonte projetado. Se o projeto experimental não atender aos critérios de performance estabelecidos, são feitas modificações e é repetida a análise, até que se obtenham resultados satisfatórios.

O terceiro estágio é a Seleção Estratégica. Consiste na avaliação do ponto de vista técnico, e dos custos associados ao atendimento da vida do projeto, das soluções estruturalmente viáveis identificadas no segundo estágio. Caso tenha sido identificada mais de uma alternativa estruturalmente viável, as avaliações realizadas nesse estágio são fundamentais para que seja selecionado o projeto mais adequado. O resultado desse estágio é a seleção final do projeto de pavimento a ser executado.

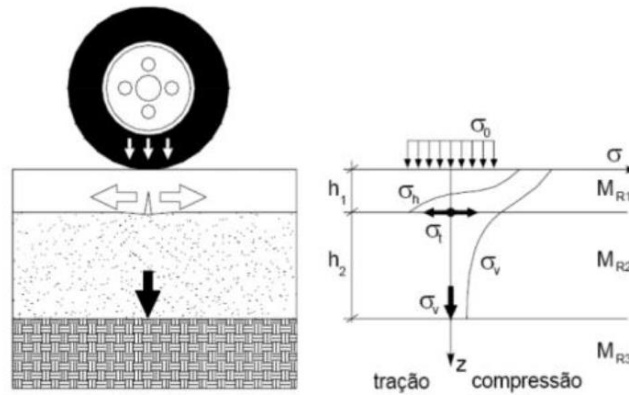
São várias as metodologias com caráter mecanicista-empírico. Como dito anteriormente o que pode mudar é a ferramenta de obtenção do estado de tensões, critérios de desempenho e os fatores campo laboratório para determinar a capacidade resistiva dos materiais.

4.3. Teoria do Comportamento Estrutural dos Pavimentos Asfálticos

A estrutura de um pavimento é caracterizada por um meio multicamadas solicitadas por um carregamento superficial distribuído em uma área circular podendo ser modelada pelas teorias da elasticidade linear em sistemas multicamadas e contínuos (FRANCO,2007).

Os percursos na aplicação da teoria da elasticidade na problemática da pavimentação foram Boussinesq (1885) e Burmister (1943). As Equações de Burmister (1943), soluções para meios estratificados, de duas e três camadas elásticas foram o primeiro passo para a determinação das tensões, deslocamentos e deformação em problemas multicamadas, mais tarde, com o auxílio da computação conseguiu-se soluções para mais camadas.

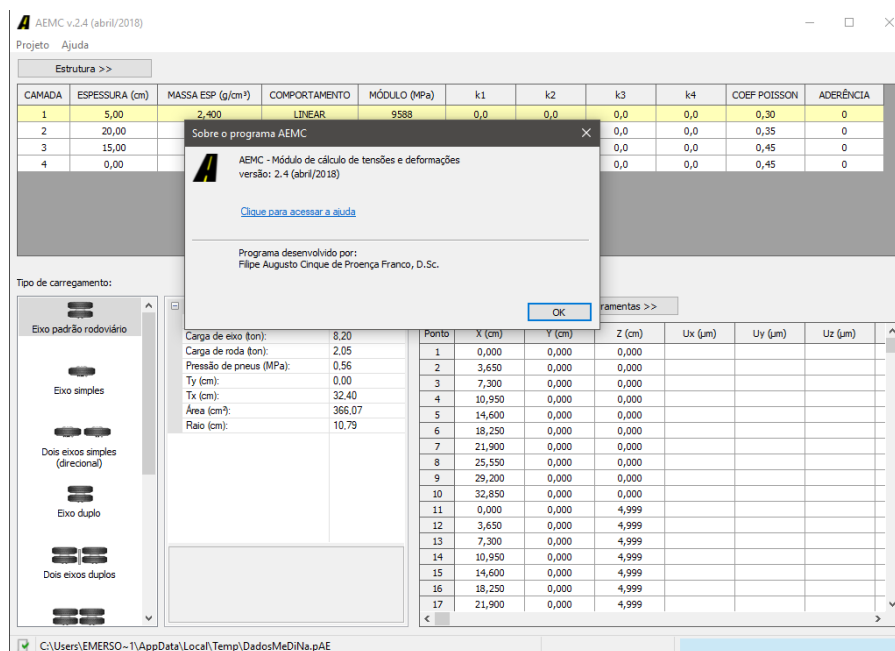
Figura 4.4- Esquema de modelagem da teoria da elasticidade no interior do pavimento asfáltico



Fonte: MOTTA, MEDINA (2005)

Para o cálculo das tensões e deformações no interior do pavimento o MeDiNa tem uma sub-rotina, Programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC).

Figura 4.5- Tela da sub rotina EAMC



Fonte: AEMC (2018)

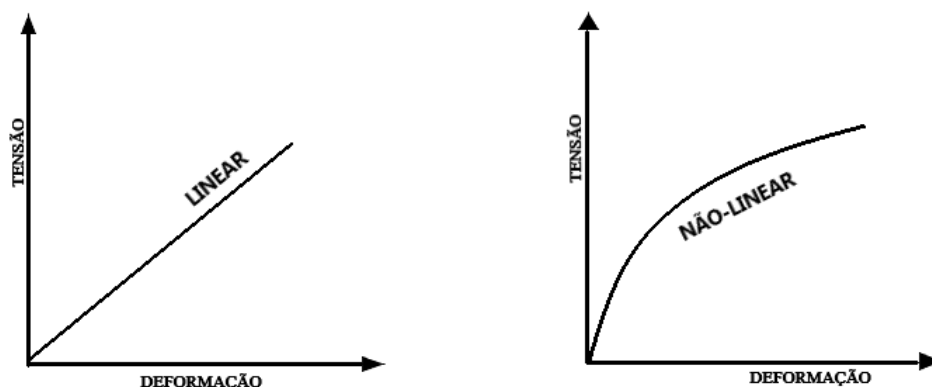
Esse *software* usa a teoria da elasticidade, para tanto, as hipóteses assumidas na modelagem da estrutura do pavimento são as seguintes:

- os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;

- b) a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- c) as camadas não têm peso, para efeito do cálculo do estado de tensões e deformações;
- d) as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- e) todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- f) a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- g) na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- h) a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- i) a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- j) as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

A condição de comportamento elástico-linear considera que as propriedades elásticas de cada camada não variem ao longo de sua espessura e a relação tensão-deformação seja representada por uma função linear. Cabe enfatizar que os materiais de pavimentação não têm comportamento elástico linear. Na verdade, de modo geral se comportam de maneira elástico não linear. No entanto, a necessidade de determinar o estado de tensões em um meio multicamada com o uso das equações de Burmister da teoria da elasticidade requer que seja assumida essa simplificação.

Figura 4.6- Curvas comportamento mecânico dos materiais



Fonte: Autor (2018)

Além das soluções analíticas baseadas nas equações de Burmister, o cálculo também é possível pelo método dos elementos finitos. Para Franco (2007) independente do método, todas

as soluções buscam resolver um sistema de equações diferenciais que satisfaçam as condições de contorno por meio de um algoritmo conhecido de cálculo. Como, em geral, a solução exata do sistema é de difícil obtenção e envolve muitos cálculos, é comum a ocorrência de erros de manipulação numérica resultantes do truncamento de valores muito pequenos ou devido aos processos computacionais de aproximação. As diferentes técnicas podem conduzir a resultados distintos de tensões, deformações e deslocamentos que podem influir no dimensionamento de uma estrutura.

4.4. Carregamento da Estrutura

O Eixo Padrão Rodoviário é usado no Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos como configuração de rodas para analisar a solicitação do tráfego. A sua adoção foi necessária, em virtude do modelo de desempenho de fadiga¹ interpretar as solicitações de tráfego em termos de operação do eixo padrão. Todos os veículos com suas diversas configurações de carga e eixo, junto das suas respectivas repetições são transformadas em Número Equivalente de Passagens do Eixo padrão Rodoviário. O procedimento para obtenção do número N segue o mesmo roteiro do Método Empírico.

$$N = V_t \cdot F_v \quad (4.1)$$

❖ Eixo Padrão Rodoviário

A carga da roda é tomada como distribuída uniforme em uma área de contato circular entre o pneu e a superfície do pavimento. A tensão solicitante de contato é adotada como a pressão de inflação dos pneus do eixo padrão, 0,56MPa. A figura (4.7) mostra a configuração do eixo padrão rodoviário.

Dados do eixo padrão

Carga de Eixo: 8,2 tonf

Pressão de Pneus: 0,56 MPa

Distância entre rodas: 32,4cm

A área de contato dos pneus do Eixo padrão:

$$A_c = \frac{F}{P} = \frac{8,2tf/4}{0,56MPa} = 0,0366m^2$$

Para cada roda do Eixo padrão a área de contato tem um diâmetro de 21,58 cm.

¹ Os modelos de desempenho de fadiga serão apresentados a frente

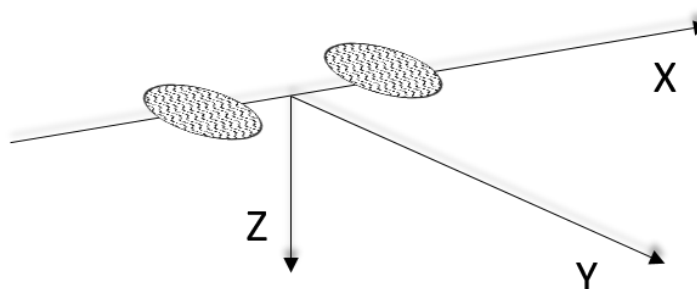
Figura 4.7 - Eixo Padrão Rodoviário



Fonte: MeDiNa (2018)

A orientação espacial do pavimento no MeDiNa é conforme o sistema de coordenadas apresentados no esquema da figura (4.8). O eixo principal do dimensionamento coincide com o eixo de simetria das áreas carregadas de duas rodas laterais do Eixo Padrão Rodoviário.

Figura 4.8- Diagrama de orientação espacial usado no MeDiNa



Fonte: MeDiNA (2018)

4.5. Propriedades dos Materiais de Pavimentação

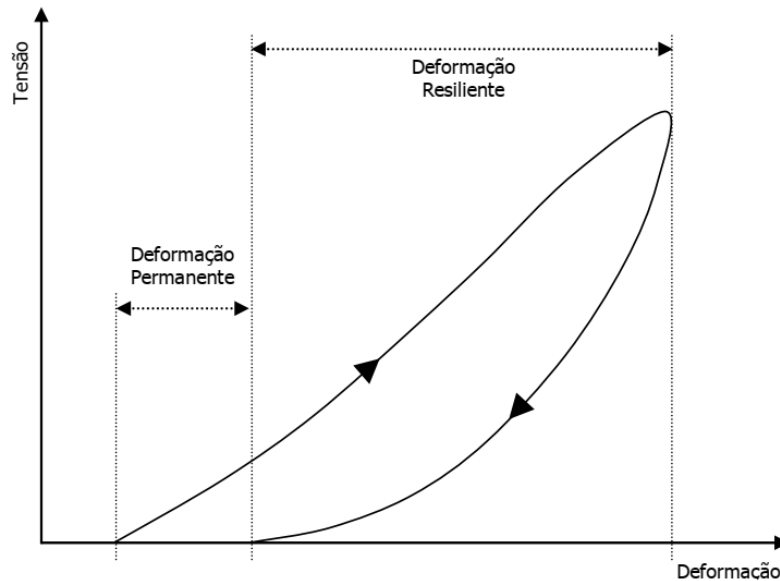
A caracterização dos materiais de pavimentação é uma tarefa complexa devido a sua heterogeneidade em relação aos fatores que afetam as propriedades dos materiais, tais como: questões ambientais, frequência de cargas, estado de tensões e deformações, envelhecimento dos ligantes asfálticos e magnitude das tensões (FRITZEN, 2016).

A avaliação da resistência da estrutura global do pavimento requer prévia caracterização das capacidades dos seus materiais constituintes. Conforme Motta (1991) apud Franco (2007), essas capacidades são avaliadas por meio de ensaios que reproduzam o estado de tensões e as condições ambientais a que os pavimentos estarão sujeitos no campo.

A maioria dos materiais de pavimentação não têm comportamento elástico puro, a lei de Hooke não se aplica diretamente. Há uma parcela de deformações permanentes com a aplicação de cargas. A figura (4.9) apresenta o comportamento dos materiais de pavimentação

sujeitos a carregamentos repetidos. Parte da deformação que ocorre na estrutura é elástica, recuperável, chamada de resiliente e outra parte corresponde à deformação permanente, plástica. Contudo, e como já dito anteriormente, em muitas simulações é comum assumir a simplificação de elasticidade linear dos materiais.

Figura 4.9- Comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a um ciclo de carregamento



Fonte: LEKARP et al. (2000)

Em fruto da complexidade da modelagem do comportamento mecânico dos materiais de pavimentação, seu estudo deve ser dividido pelos tipos de materiais: misturas asfálticas e materiais de solo.

4.5.1. Materiais Asfálticos

Para um dimensionamento analítico da camada asfáltica, é indispensável conhecer seu comportamento mecânico, especialmente quanto à sua deformabilidade elástica, ou seja, conhecer o módulo de elasticidade e o seu coeficiente de Poisson. Para Franco (2007) numa avaliação ME, o Módulo de Resiliência e Coeficiente de Poisson constituem os principais parâmetros necessários à caracterização da capacidade dos materiais (asfálticos ou granulares) do pavimento asfáltico.

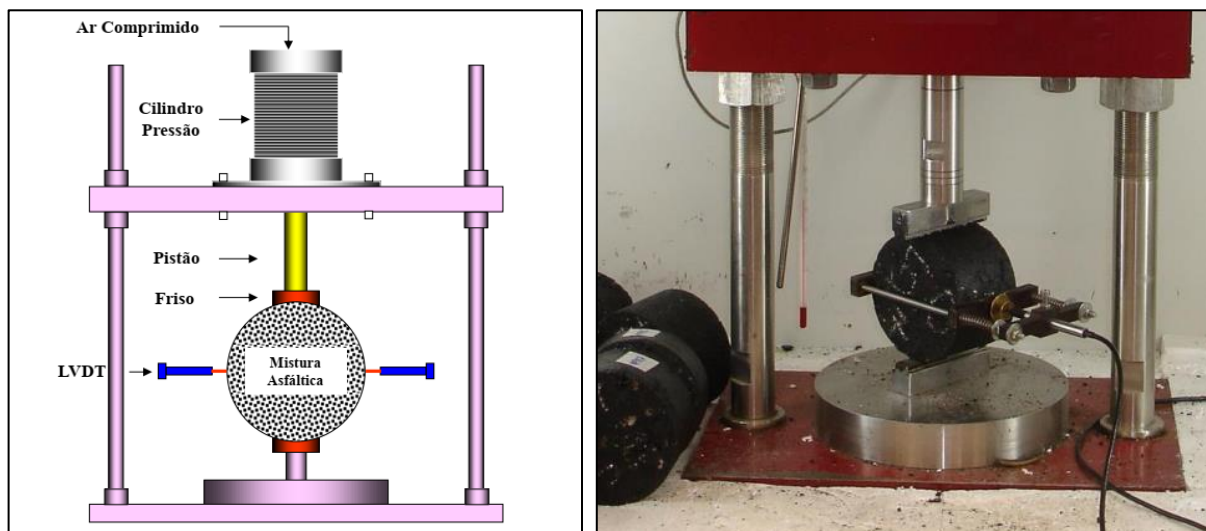
As misturas asfálticas têm módulos de deformabilidade subordinada a carga aplicada, tempo de aplicação da carga e pela temperatura do revestimento. Assim, seu comportamento é classificado como visco-termo-elástico. Porém, devido à complexidade no entendimento desse

tipo de comportamento, o revestimento asfáltico é tomado simplificadaamente como de comportamento elástico linear, Módulo de Resiliência constante (MOTTA,1991).

Segundo Coutinho (2011), Módulo de Resiliência - MR é, um “módulo de elasticidade” que expressa a relação tensão-deformação dos materiais. O coeficiente de Poisson é dado pelo inverso da relação entre a deformação vertical imposta ao material, pela deformação horizontal sofrida no corpo de prova durante o ensaio de compressão uniaxial.

Para materiais asfálticos a determinação do Módulo de Resiliência e Coeficiente de Poisson se dá com o ensaio de compressão diametral (tração indireta) de carga repetida, de acordo com a norma do DNIT 135/2018 (*Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio*). Para o ensaio, ciclos de carga de 5 % a 25 % da resistência à tração por compressão diametral são aplicados verticalmente ao corpo de prova, figura (4.10). A tensão diametralmente induz uma deformação horizontal e vertical, ambas são registradas. O Coeficiente de Poisson é dado pela equação (4.2).

Figura 4.10- Equipamento de ensaio de compressão diametral de cargas repetidas



Fonte:DNIT (2018)

$$\mu = \frac{-0,23 + 1,07 \left| \frac{\Delta H_t}{\Delta V_t} \right|}{0,78 - 0,31 \left| \frac{\Delta H_t}{\Delta V_t} \right|} \quad (4.2)$$

Onde:

μ –Coeficiente de Poisson;

ΔH_t –Deslocamento horizontal medido no meio do diâmetro do corpo de prova;

ΔV_t –Deslocamento vertical medido no meio no diâmetro do corpo de prova;

Assumindo um comportamento linear, o Modulo de Resiliência é a relação entre a tensão horizontal (tração) resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável (resiliente), equação (4.3).

$$MR = \frac{P}{|\Delta H| \cdot t} (0,2692 + 0,9976)\mu \quad (4.3)$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência, expresso em MPa;

P é a carga cíclica, expressa em N;

ΔH é o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente) mm;

t é a espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm;

μ é o coeficiente de Poisson.

O MR não é um parâmetro constante ou fixo para a maioria dos materiais de pavimentação. De acordo com Fonseca (1995) *apud* Franco (2007), a anisotropia ou a não homogeneidade podem fazer com que o Módulo de Resiliência varie pontualmente dentro de um material específico.

Motta *et al.* (2002) descrevem a variação do comportamento do MR com a variação das características da mistura. Segundo eles, de forma geral, pode-se dizer que o módulo de resiliência:

- Varia com a granulometria da mistura sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada;
- Varia com o ligante asfáltico sendo maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade;
- Não é muito sensível ao teor de asfalto, dentro da faixa normal de dosagem;
- É influenciado pela relação asfalto/ fíller e a própria natureza do fíller.

O quadro (4.1) traz algumas formulações que relacionam parâmetros do material de pavimentação com o seu MR. No quadro (4.2) são mostrados valores de típicos de Coeficiente de Poisson usados em pavimentação.

Tabela 4.1- Estimativas de MR para diversos materiais

Camada	Material	Valores sugeridos para estudos e projetos (MPA)
Subleitos	Laterítico (ILA' e LG)	$MR = 22 \cdot CBR^{0,8}$
	Não laterítico (NS' NG')	$MR = 18 \cdot CBR^{0,64}$
	Arenoso pouco ou não coesivo (LA, NA e NA')	$MR = 14 \cdot CBR^{0,7}$
Reforço	Laterítico (NA e NG)	$MR = 22 \cdot CBR^{0,8}$
	Não laterítico (NS e NG')	$MR = 18 \cdot (CBR_{REF})^{0,64} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot CBR_{SL}}{CBR_{REF}}}$
Sub-base	Granular	$MR = 18 \cdot (CBR_{REF})^{0,64} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot CBR_{SL}}{CBR_{REF}}}$
Base	Granular	$100 \leq MR \leq 500$
	Asfáltica	$800 \leq MR \leq 1.000$
	Cimentada-BGTC	$5.000 \leq MR \leq 15.000$
Revestim entos asfálticos	Concreto Asfáltico CAUQ	$3.000 \leq MR \leq 5.000$
	Pré-misturado à quente -PMQ Binder	$2.000 \leq MR \leq 2.500$
	Pré-misturado à frio-PMF ou macadame betuminoso	$1.400 \leq MR \leq 1.800$
	Selado-MB	$1.000 \leq MR \leq 1.400$

Fonte BALBO (2007)

Tabela 4.2- Valores típicos de coeficiente de Poisson

Material	Faixa de variação
Concretos asfálticos	0,32- 0,38
Concreto de cimento Portland	0,15 – 0,20
BGS, MH, BC	0,35 – 0,40
CCR, BGTC	0,15-0,20
SC, SMC	0,20 – 0,30
SCA	0,25 – 0,30
Solos arenosos	0,30 – 0,35
Areias compactadas	0,35 - 0,40
Solos finos	0,40 – 0,45

Fonte: BALBO (2007)

4.5.2. Materiais de Solos

Os solos finos, siltosos ou argilosos, salvo os solos lateríticos, comumente não são aplicados na confecção das camadas estruturais de pavimento. Graças a sua baixa qualidade de resistência ou capacidade de suportar deformações permanentes, a construção das camadas do pavimento é reservada ao uso de materiais granulares de solo. Contudo, solos finos são encontrados no subleito por ser ordinariamente uma camada natural em que não há substituição de material.

Muitas das características de engenharia da camada de material de solo usado no pavimento dependem das propriedades de suas partículas constituintes. Isso está relacionado à geologia da rocha mãe, sua composição mineral e à sua dureza. Possíveis materiais contaminantes também podem afetar as características do material, pois interferem no atrito entre agregados e a sua durabilidade.

A forma de produção dos agregados condicionando a maneira como a rocha é britada configura outro fator interveniente às propriedades de engenharia do pavimento, sobretudo nos mecanismos de consolidação, distorção e atrito. Isso é válido também para o revestimento asfáltico, pois o mesmo contém brita. A consolidação é relativa à mudança de forma e compressão do conjunto de partículas. A distorção é provocada por uma curvatura, inclinação e arredondamento das partículas individuais. E o atrito está relacionado a capacidade das partículas rolarem entre si.

A densidade de compactação, granulometria, qualidade dos finos, tamanho das partículas, umidade, histórico de tensões e frequência de carregamento são todos fatores que influem na resiliência do material de solo. Entretanto, para Franco (2007) o efeito do estado de tensões é o mais significativo para o comportamento do material. Logo, é primordial que a relação tensão versus deformações seja modelada.

Materiais de solos apresentam um comportamento elasto-plástico complexo quando submetidos a um carregamento de veículos em movimento. Assim sendo, as respostas dessas camadas às solicitações das operações dos veículos são caracterizadas por deformações recuperáveis ou resilientes e pelas deformações residuais ou permanentes. Para Medina e Motta, (2005), pavimentos asfálticos com camadas granulares espessas precisam da consideração da não linearidade da camada. O programa MeDiNa em sua sub-rotina EAMC de cálculo de estado de tensões dá ao projetista a seu critério, a opção de simular os materiais granulares e solos finos com o seu Módulo de Resiliência constante ou variável.

Em um material de solo em que é assumida a aplicação da lei de Hooke generalizada, obtêm-se os valores MR por ensaio triaxial cíclico de acordo com a norma do DNIT 134/2017 (*Pavimentação – Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*). O MR dos solos é dado pela relação entre a tensão-desvio aplicada repetidamente na amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical recuperável, conforme a equação (4.4). A aparelhagem para o ensaio triaxial é mostrada na figura (4.11).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (4.4)$$

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4.5)$$

Onde:

MR - Módulo de resiliência ou relação tensão-deformação do material;

σ_d - Tensão desvio;

ϵ_r - Deformação específica axial resiliente;

σ_3 - Tensão confinante;

σ_1 - Tensão vertical.

No entanto, quando o material de solo é investigado com mais rigor e considerado elástico não linear, ou plástico, ou viscoso, ou mesmo a combinação variada destes fatores. Esses comportamentos diferenciados do material obrigam a busca de modelos empíricos mais específicos que descrevam em função do MR, as tensões e deformações (COUTINHO, 2011).

Para a modelagem desse comportamento elástico não linear o programa MeDiNa usa a abordagem clássica. Essa linha de trabalho é caracterizada pelo uso das tensões e deformações desvio e de confinamento (FRANCO, 2007). A modelagem é dada na equação (4.6).

$$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3} \cdot \theta^{K_4} \quad (4.6)$$

No modelo apresentado na expressão (4.6), k_1 , k_2 , k_3 e k_4 são constantes apuradas em laboratório por meio de ensaio triaxial no qual o corpo de prova é submetido à deformações plásticas.

Onde:

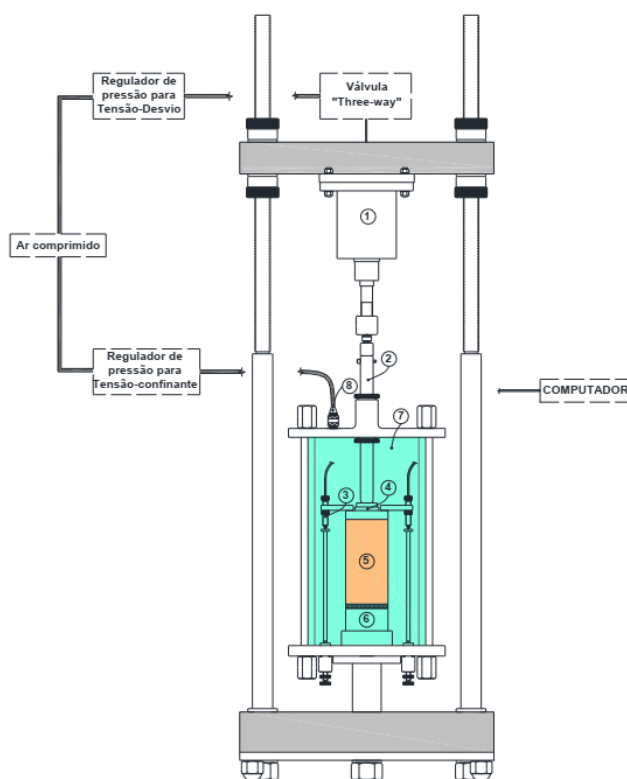
θ - Tensão octaédrica (igual à soma das tensões principais $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$);

σ_d - Tensão desvio;

σ_3 - Tensão de confinamento;

MR - Módulo de resiliência em MPa.

Figura 4.11 - Aparelhagem para determinação do MR dos Solos – Esquema do equipamento Triaxial de carga repetida.



Fonte: DNIT (2017)

Vale ressaltar que os resultados do MeDiNa e de qualquer outro método de dimensionamento ME são tão confiáveis quanto os dados fornecidos pelo projetista relativos ao subleito e aos demais materiais que irá aplicar no pavimento.

4.6. Modelos de Desempenho dos Pavimentos Asfálticos

A avaliação do desempenho dos pavimentos asfálticos é feita pela análise de dois critérios de ruptura: a ruptura estrutural e a ruptura funcional. A ruptura estrutural caracteriza o colapso efetivo da estrutura do pavimento ou de seus elementos incapacitando o pavimento de suportar qualquer carga imposta na superfície. A ruptura funcional caracteriza um estado de degradação que gera desconforto ao rolamento dos veículos, diminuição da segurança das operações, aumento do risco de aquaplanagem devido às irregularidades e defeitos gerados pelo trincamento, ou ainda por grandes deformações permanentes (FRANCO, 2007).

A ruptura do pavimento, no método MeDiNa, está associada aos seguintes danos:

- Deformação permanente, ou afundamento de trilha de roda;
- Dano de fadiga.

Figura 4.12- Pavimento com dano ruptura estrutural e ruptura funcional



Fonte: IPR (2017)

O entendimento desses processos de deterioração é feito através de modelos de previsão de desempenho. Um modelo de previsão de desempenho é uma função que permite quantificar a redução do nível de serventia ou a geração de defeitos ao longo da vida de serviço do pavimento. Para o DNIT (2016), tal modelo é denominado "mecanístico-empírico" quando é constituído por três partes:

- I. Um Modelo Estrutural para cálculo na forma de tensões, deformações ou deflexões elásticas provocadas pelas cargas de roda em movimento nas camadas do pavimento, que estejam relacionadas ao surgimento ou à propagação de defeitos na estrutura;
- II. Funções de Transferência, capazes de relacionar as respostas da estrutura às cargas do tráfego, à geração e propagação de defeitos. Além de atenderem a determinadas condições de contorno, exigidas pelo problema, essas funções deverão basear-se em teorias empiricamente validadas, que descrevam o mecanismo com que a deterioração acontece.
- III. Fatores ou Funções de Calibração, que ajustam as previsões das Funções de Transferência de modo a se reproduzir dados de uma determinada base empírica. São responsáveis, portanto, pela consideração de parâmetros que não puderam ser explicitados, seja no modelo estrutural ou nas Funções de Transferência, tais como: clima, características específicas do tráfego atuante, particularidades dos materiais e de sua variabilidade.

Para Darous (2003), esse é o elo mais fraco no método ME, os modelos matemáticos obtidos de regressões de dados de ensaios em laboratório e que tentam traduzir as tensões, as

deformações e os deslocamentos em danos nos pavimentos. Apesar do avanço das pesquisas e das técnicas de ensaios no campo e no laboratório, o fator de calibração entre o campo e o laboratório, ponto onde se encontra o empirismo, ainda não deixou de ser utilizado.

4.6.1. Fadiga do Revestimento Asfáltico

No Brasil, o trincamento por fadiga do revestimento asfáltico é um dos principais problemas observados nas rodovias. Esse fenômeno tem uma natureza complexa e pode estar relacionado a vários fatores, tais como: escolha dos materiais, efeitos climáticos, características do tráfego e da estrutura do pavimento (FRITZEN,2016).

A fadiga é uma degradação estrutural progressiva provocada por solicitações repetidas ou oscilantes com intensidade inferior à tensão de ruptura do material asfáltico que podem gerar trincas ou efetiva ruptura após um número suficiente de repetições. No pavimento essa fadiga ocorre pela repetição das operações dos veículos que geram microfissuras acumulativas que por fim acometem a estrutura do revestimento (FRANCO, 2007).

Inicialmente a fadiga provoca trincas onde as tensões são maiores. Com a continuação do processo as trincas se espalham por toda espessura da camada permitindo a passagem de água da superfície para a estrutura. Isso enfraquece e reduz o desempenho global do pavimento e configura um dos principais processos de ruptura dos pavimentos (FRANCO, 2007).

Na metodologia MeDiNa o revestimento asfáltico é dimensionado unicamente à base dos danos por fadiga. O dano por fadiga é evidenciado pelas trincas que surgem no revestimento asfáltico, onde a área trincada em percentual é dada pela equação (4.7). A calibração dos danos por fadiga em termo de área trincada é feita com base no trabalho de Fritzen (2016).

Figura 4.13- Fadiga do revestimento do pavimento asfáltico



Fonte: IPR (2017)

$$AT(\%) = \frac{N_{\text{trincado}}}{N_{\text{total}}} \cdot 100 \quad (4.7)$$

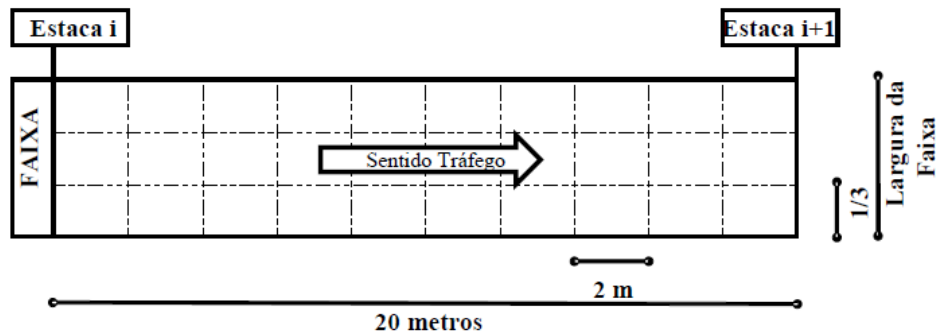
Onde:

$AT(\%) = \text{Área Trincada,}(\%)$;

$N_{\text{trincado}} = \text{Número de células trincada;}$

$N_{\text{total}} = \text{Número total de células do segmento experimental.}$

Figura 4.14 - Esquema para quantificar a área trincada no pavimento



Fonte: FRITZEN (2016)

A vida de fadiga em um revestimento asfáltico é definida como a quantidade de veículos expresso por número do Eixo Padrão Rodoviário (N) que o pavimento suporta antes de ser observado uma porcentagem de área trincada acima do admissível para a estrutura do pavimento.

❖ Curva de Fadiga

O comportamento de misturas asfálticas quanto à fadiga sob carregamento repetido pode ser equacionado pela função curva de fadiga.

$$N_f = K_1 \cdot \varepsilon_t^{K_2} \quad (4.8)$$

Onde:

N_f –Número de aplicações de carga;

K_1 e K_2 –Coeficientes obtidos por ensaio que dependem da mistura asfáltica;

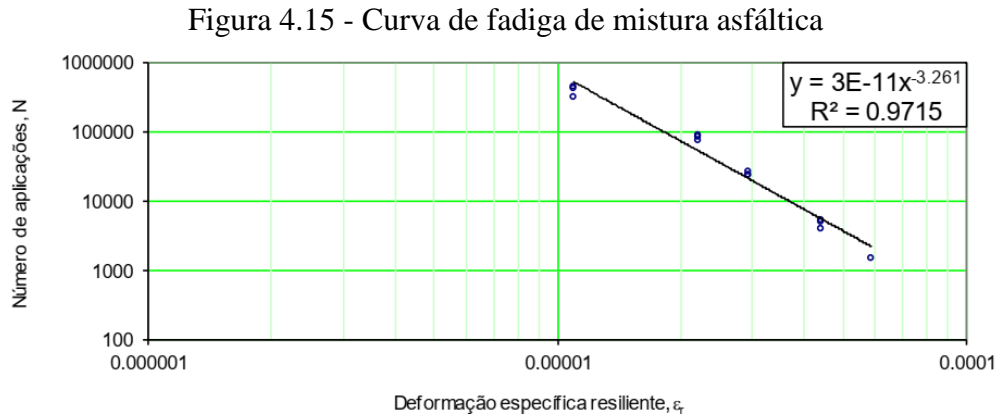
ε_t –Deformação específica resiliente.

A caracterização dos coeficientes K_1 e K_2 é proposta pela da norma do DNIT ainda em fase de consulta pública *Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral a tensão controlada – Método de ensaio*. Essa norma foi criada especialmente nos estudos do DNIT para uso no Método de Dimensionamento Nacional de Pavimento. O equipamento para tal ensaio é similar ao usado no ensaio de MR de misturas asfálticas, mostrado na figura (4.10).

Neste ensaio, submete-se uma amostra do material asfáltico a uma aplicação de carga repetida até a ruptura. O carregamento vertical diametral pulsante gera uma tensão de tração

perpendicular à direção da carga aplicada que provoca a ruptura do corpo de prova ao longo da parte central do plano diametral vertical. A vida de fadiga é o número total de aplicações de carga que provoca a ruptura do corpo de prova a cada nível de tensão.

Ao se realizar vários ensaios para diferentes cargas verticais induzindo diferentes deformações, é determinado a curva de fadiga do material asfáltico. A figura (4.15) mostra uma curva de fadiga típica de material asfáltico.



Fonte: DNIT (2018)

❖ Calibração da Função Transferência

Observe o desafio da função de transferência. É preciso relacionar as tensões que se desenvolvem no interior do pavimento e a capacidade resistiva a fadiga do material asfáltico com a área trincada no pavimento. É interessante caracterizar o dano por fadiga em termos de área trincada, porque esse dano poder ser quantificado em campo, como mostrado com a equação (4.7) e no esquema da figura (4.14).

O trabalho de Fritzen (2016), estabelece uma correlação entre o dano por fadiga e a área trincada. Seu estudo se desenvolveu em torno de avaliações em 6 tipos de misturas asfálticas e 45 pistas experimentais com diferentes condições de tráfego. Essa modelagem foi desenvolvida especificamente para ser aplicada no Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos-MeDiNa.

O padrão da evolução da área trincada na função de transferência foi representado por uma curva sigmoideal definida pela equação (4.9).

$$AT(\%) = \frac{e^{-A} \cdot e^{-B}}{1 - e^{-B}} \quad A = \left(\frac{N' - 1}{Z - 1} \right)^n \quad B = \left(\frac{-1}{Z - 1} \right)^n \quad (4.9)$$

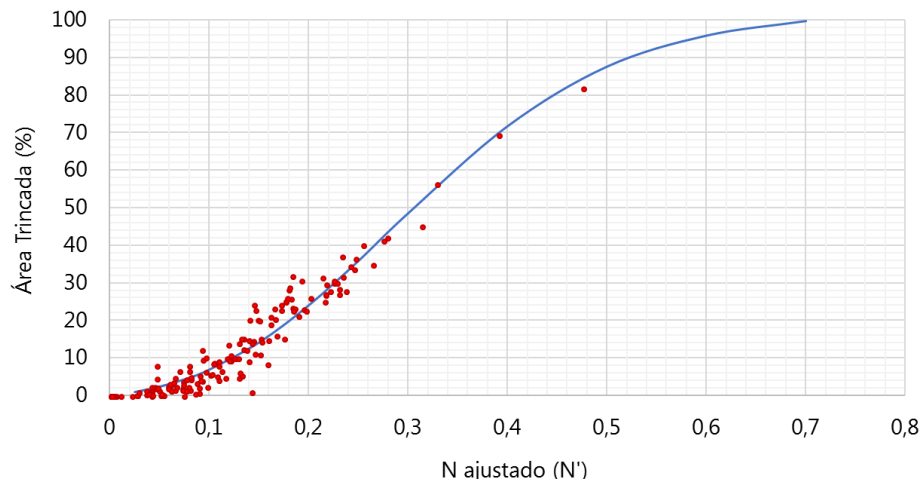
Onde:

Z e n - Parâmetros da curva sigmoide;

AT (%) - Área trincada estimada em percentual;
 N' - Número equivalente deslocado.

A figura (4.15) mostra o gráfico da evolução da área trincada obtido a partir das observações feitas nos pavimentos estudados, (FRITZEN, 2016). Com a interpolação dos pontos amostrados determinou-se os parâmetros Z e n iguais a 0,25 e 5,0 respectivamente com um coeficiente de determinação $r^2=0,82$.

Figura 4.16 – Curva da função de transferência



Fonte: MeDiNa (2018)

N' é uma calibração do número de passagens do Eixo Padrão Rodoviário, foi implementado na expressão da curva sigmoide para minimizar o erro com a evolução da área trincada. A expressão do Número N ajustado pelo Fator de Deslocamento está apresentada a equação (4.5).

$$N' = (N \cdot fS) \cdot 10^{-10} \quad (4.5)$$

Onde:

N - Número de repetições do eixo padrão quando foi realizada a medição da área trincada;

fS - Fator de deslocamento atribuído de forma aleatória até minimizar o erro entre a evolução da área trincada com a curva sigmoide padrão;

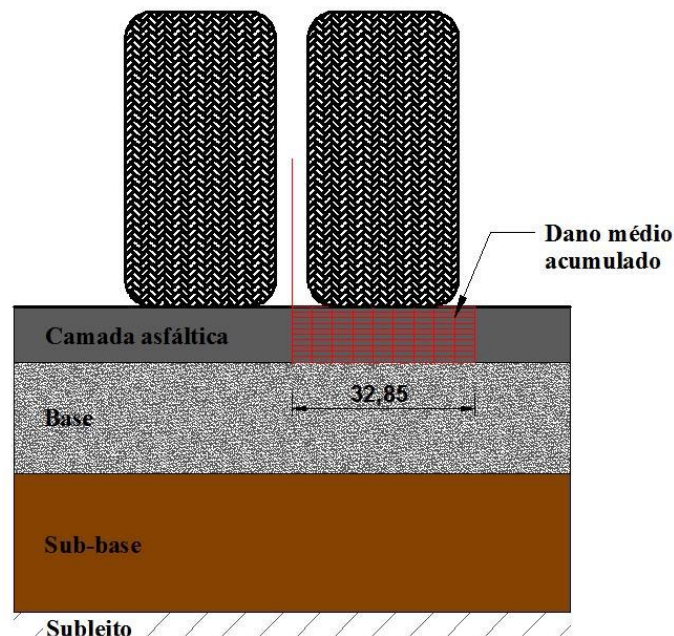
N' - Número N ajustado.

Até essa etapa a função de transferência relaciona a passagem de veículos (N) com os danos de Área Trincada. No entanto, é preciso implantar nessa modelagem informações da estrutura do pavimento. A degradação por fadiga depende do material asfáltico, da sua

espessura e do estado de tensões que o solicitam. Agora essas informações são embutidas no fator de deslocamento (fS).

De posse da tensão solicitante da passagem do eixo padrão, espessura do revestimento, e suas propriedades elásticas, o *software* MeDiNA calcula a estado de tensões em 10 pontos na face superior e 10 pontos na face inferior da camada de revestimento. Os pontos são distribuídos em uma grade com os 10 pontos dispostos na direção horizontal a partir do centro do carregamento (considerando o eixo padrão) – ponto 0 cm até 32,85 cm na superfície e na face inferior da camada asfáltica, figura (4.16).

Figura 4.17- Representação dos pontos onde os danos são avaliados na camada de revestimento asfáltico



Fonte: Fritzen (2016)

De cada ponto é extraído a informação da deformação específica, e com o uso da curva de fadiga do material asfáltico é determinado sua respectiva vida de fadiga (N_f). O dano médio dos 20 pontos é calculado pela divisão de uma aplicação do eixo de carga padrão rodoviário pelo número permissível de aplicações de eixos de carga (N), expresso por:

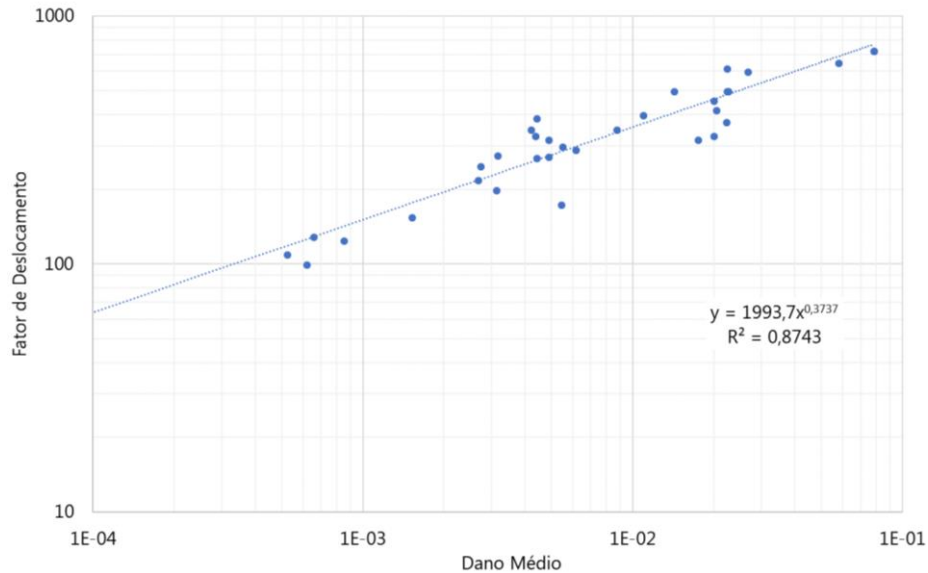
$$D_{\text{médio}} = \frac{1}{20} \sum \left(\frac{1}{N_f} \right) \quad (4.6)$$

A informação do dano médio dos 20 pontos é levado à função de transferência por meio da expressão da Função Deslocamento apresentado na equação (4.7), onde os fatores C1 e C2

são definidos por 1993,7 e 0,3737 respectivamente. A figura (4.17) mostra o gráfico do processo de calibração da Função de Deslocamento.

$$fS = C1 \cdot (D_{\text{médio}})^{C2} \quad (4.7)$$

Figura 4.18 – Curva de calibração da Função de Deslocamento



Fonte: Medina (2018)

Com todas essas expressões é possível relacionar informações da estrutura resistiva do pavimento- informações laboratoriais- com informações de campo que é a área trincada nas condições reais. Isso garante uma suficiente modelagem do desempenho do pavimento. A expressão final da modelagem da fadiga da camada asfáltica em termos de área trincada e dado na equação (4.8).

Vale observar que, na condição de ser uma formulação empírica e não contemplar analiticamente todas as variáveis da qual as trincas realmente dependem, foram necessárias essas várias calibrações até que se conseguisse uma convergência entre o que a equação modelo prevê e os dados observados em campo, por isso tantas potências e coeficientes no modelo.

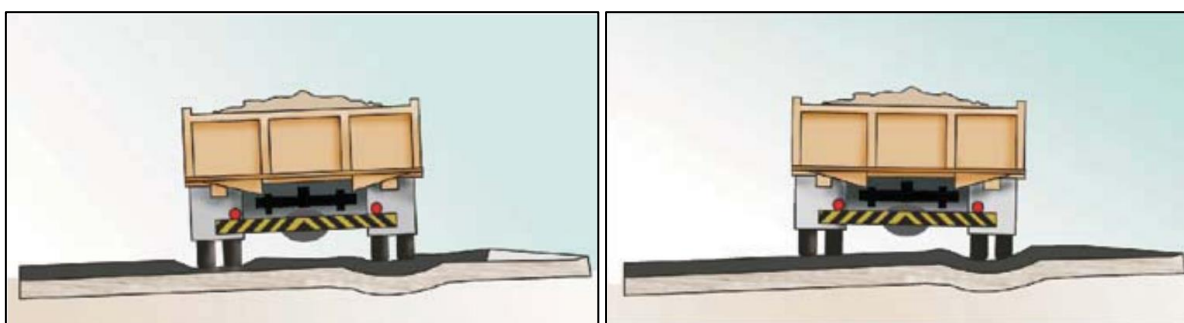
$$AT(\%) = \frac{\left\{ e^{-\left[\frac{N \cdot \left(1,993 \cdot \left(\frac{1}{20} \sum \frac{1}{N_f} \right)^{0,3737} \right) \cdot 10^{-10}}{0,25-1} \right]^5} \right\} \cdot \left\{ e^{-\left[\frac{-1}{0,25-1} \right]^5} \right\}}{1 - \left\{ e^{-\left[\frac{-1}{0,25-1} \right]^5} \right\}} \quad (4.8)$$

4.6.2. Deformação Permanente

As ações das cargas dos veículos induzem deformações na estrutura do pavimento. Como já dito anteriormente, são duas deformações, deformações elásticas (reversíveis, resilientes) e deformações plásticas. As últimas, por terem um caráter irreversível, se acumulam a cada operação dos veículos e geram o afundamento de trilha de roda. Cada camada do pavimento é acometida por alguma parcela de deformação permanente total da estrutura. Assim, para estimar-se os afundamentos totais na trilha de roda, é necessário discretizar o mecanismo de deformação de cada um dos materiais componentes das camadas do pavimento.

Esses afundamentos ao longo das trilhas de roda, dificultam a drenagem de água e aumentam o risco de aquaplanagem. Conseqüentemente, isso traz prejuízos aos níveis de segurança e conforto. Segundo Balbo (2007), a deformação permanente pode resultar na perda de qualidade do pavimento em relação ao rolamento, ocorrendo comumente onde este apresenta baixa capacidade de resistência das camadas inferiores, onde há fluxo de veículos mais pesados e faixas de tráfego estreitas ou canalizadas.

Figura 4.19 - Esquema de deformação permanente



Fonte: BERNUCCI et al. (2008)

❖ CAMADA ASFÁLTICA

A deformação permanente na camada asfáltica é significativa, contudo no programa MeDiNa sua consideração é simplificada ao atendimento do parâmetro Flow Number. O Flow Number (FN) é um parâmetro balizador do comportamento de misturas asfálticas.

O Flow Number é obtido por meio do ensaio normatizado pelo DNIT, *Pavimentação - Misturas asfálticas -Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente*, esse ensaio ainda está em consulta pública, o mesmo foi elaborado especialmente para o MeDiNa..

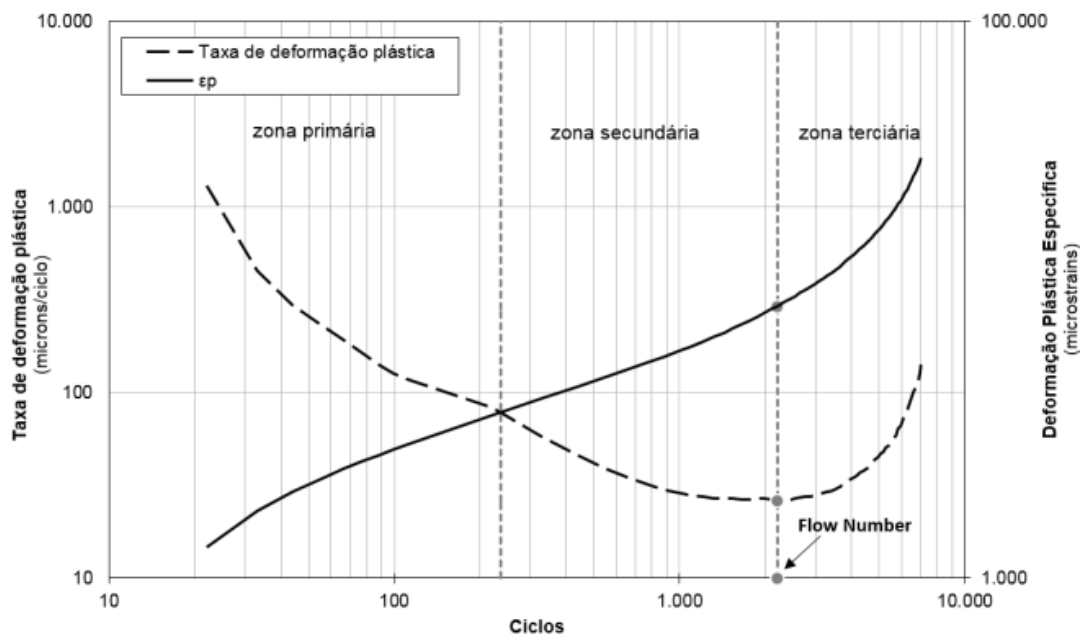
Nesse ensaio um corpo de prova cilíndrico é submetido a um repetido carregamento de compressão vertical. A figura (4.20) mostra um esquema de montagem do ensaio de Flow Number. O ensaio é traduzido em gráficos de deformação permanente vertical uniaxial e taxa de deformação plástica vertical versus números de ciclos de aplicação da carga. A figura (4.20) mostra um gráfico típico.

Figura 4.20 - Esquema de montagem do ensaio de Flow Number (FN)



Fonte: DNIT (2018)

Figura 4.21 - Curva típica do ensaio uniaxial de carga repetida: deformação plástica vertical uniaxial acumulada versus número de ciclos.



Fonte: DNIT (2018)

O Flow Number-FN é o ciclo da curva de deformação plástica vertical acumulada por número de ciclos onde começa a zona terciária, definido como o ponto onde a taxa de deformação é mínima durante o ensaio uniaxial de carga repetida. A passagem da zona secundária para a zona terciária caracteriza a ruptura pelo início do cisalhamento a volume constante.

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

Tabela 4.3 – Flow Number para cada condição de operação do eixo padrão

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

Fonte: MeDiNa (2018)

As condições normais de tráfego e via são aquelas quando se tem velocidades acima 60 km/h, via sem intersecções, sem terceira faixa e/ou temperatura máxima do revestimento asfáltico moderada. As condições severas são: tráfego lento (velocidade menor do que 60 km/h), intersecções, terceira faixa, praças de pedágio, tráfego canalizado, paradas de ônibus e/ou temperatura máxima do revestimento elevada. Considera-se a temperatura máxima moderada do revestimento asfáltico quando a temperatura máxima média de sete dias consecutivos, a 20 mm de profundidade for igual ou inferior a 64°C. Quando a mesma temperatura máxima média for superior a 64°C, então considera-se elevada.

O programa MeDiNa, após realizar a avaliação do pavimento ou o dimensionamento da estrutura, irá apresentar o valor do Flow Number como propriedade da Camada asfáltica e que deverá ser exigido no controle de qualidade durante a obra, respeitando as condições normal ou severa do local onde o pavimento será construído.

❖ CAMADAS DE SOLO

Para o MeDiNa a deformação permanente total do pavimento é a soma da contribuição das deformações de cada camada de solo. A deformação nessas camadas é avaliada pela modelagem dada na equação (4.9) proposta de Guimarães (2009). Esse modelo de desempenho

foi formulado a partir de ensaios triaxiais em que foi avaliado um padrão de relação entre deformação permanente, estado de tensões e repetições de aplicação da tensão desviadora.

$$\varepsilon_p(\%) = \Psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\Psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\Psi_3} \cdot N^{\Psi_4} \quad (4.9)$$

Onde:

$\varepsilon_p(\%)$: Deformação Permanente Específica;

Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 e Ψ_4 : parâmetros de regressão do modelo obtidos por ensaio;

σ_3 : tensão confinante em kgf/cm²;

σ_d : tensão desvio em kgf/cm²;

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

N: número de ciclos de aplicação de carga

Guimarães (2009), indica os principais fatores que afetam a deformação permanente em solos, quais sejam:

- Tensão: estado de tensões, rotação das tensões principais com o deslocamento da carga de roda e história de tensões.
- Carregamento: magnitude, número de aplicações, duração, frequência e sequência de carga.
- Umidade: percentual, permeabilidade do material, grau de saturação e poro-pressão.
- Agregado: tipo de agregado, forma da partícula, granulometria, porcentagem de finos, tamanho máximo dos grãos e massa específica real dos grãos.

A determinação dos coeficientes da expressão (4.9) é feita por ensaio triaxial de carga repetida (o método de ensaio ainda não está normatizado pelo DNIT). O equipamento de ensaio é o mesmo do mostrado na figura (4.11). É aplicado uma série de repetidos carregamentos, variando os valores de tensão confinante e tensão desviadora, e registrado as deformações plásticas que o corpo de prova assume.

A tabela (4.4) reúne alguns parâmetros Ψ_i do modelo proposto para diversos materiais, bem como os respectivos coeficientes de correlação obtidos e a classificação dos materiais.

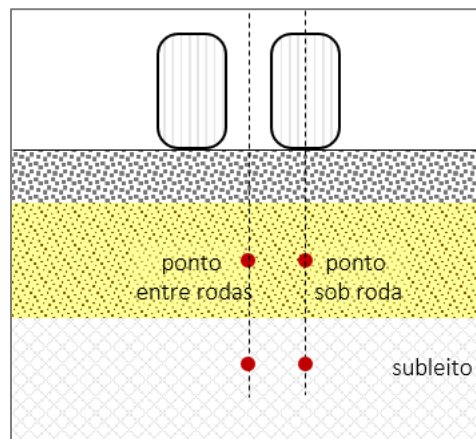
Tabela 4.4 – Parâmetros do Modelo de Previsão da Deformação Permanente

Item	Material	Classificação	$\epsilon_p^{esp}(\%) = \psi_1(\sigma_3)^{\psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\psi_3} \cdot (N)^{\psi_4}$				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'	0,206	-0,24	1,34	0,038	0,986
6	Areia Argilosa do ES	LG'	0,643	0,093	1,579	0,055	0,909
7	Solo Papucaia	NS'/NA'	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'	Não recomendado				

Fonte: Guimarães (2009)

Para o cálculo da deformação permanente, o programa MeDiNa utiliza o estado de tensões calculado nos pontos sob a roda e entre as rodas, no centro das camadas conforme mostrado na figura (4.22).

Figura 4.22- Pontos de análise da deformação permanente no interior do pavimento.



Fonte: MeDiNa (2018)

A deformação permanente calculada para cada camada é somada para compor a deformação permanente total utilizada no dimensionamento, equação (4.9).

$$\delta_{P_{total}} = \sum_i^n (\varepsilon_{p(i)} \cdot h_i) \quad (4.9)$$

$\delta_{P_{total}}$ – Deformação permanente total;

$\varepsilon_{p(i)}$ – Deformação específica da camada (i);

h_i – Espessura da camada (i).

4.7. Tipos de vias, Limites de Danos e Confiabilidade

Estabelecido como quantificar os danos na estrutura, o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos estabelece os limites máximos toleráveis de danos em área trincada e deformação permanente. A tolerância está condicionada a hierarquia da rodovia analisada, os valores são mostrados na tabela (4.5).

Como já justificado o entendimento e quantificação das diversas variáveis necessárias ao projeto de rodovia são complexas. São assumidas simplificações, valores médios além do empirismo. Numa avaliação determinística do pavimento, a ferramenta utiliza os parâmetros médios para a previsão dos principais tipos de danos ao longo da vida de serviço do pavimento. Essa previsão, na condição de ser baseada em valores médios de todas as variáveis de entrada representa um dano estimado com uma confiabilidade de 50%. Em outras palavras, existe uma probabilidade de 50% do dano ser maior ou menor que o dano previsto (FRANCO,2007).

Tudo isso leva à necessidade de um tratamento estatístico quanto a assertividade do dimensionamento. A confiabilidade pode ser definida como a medida da probabilidade da serventia do pavimento permanecer em um nível adequado através da vida de serviço. É a probabilidade de um sucesso no projeto do pavimento. A tabela (4.5) mostra os valores de confiabilidades necessários para tipo de rodovia. Esses valores são usados pelo MeDiNa no dimensionamento.

O programa também estabelece os seguintes critérios para o projeto:

- Deformações permanentes específicas por camada não maiores que 5%;
- Espessura da camada de revestimento asfáltico com valores entre 5,0 cm e 15,0 cm;
- Espessura das camadas de solos com valores entre 10,0 cm e 40,0 cm.

Tabela 4.5– Critérios de dimensionamento do MeDiNa

TIPO DE VIA	CONFIABILIDADE	ÁREA TRINCADA	DEF. 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

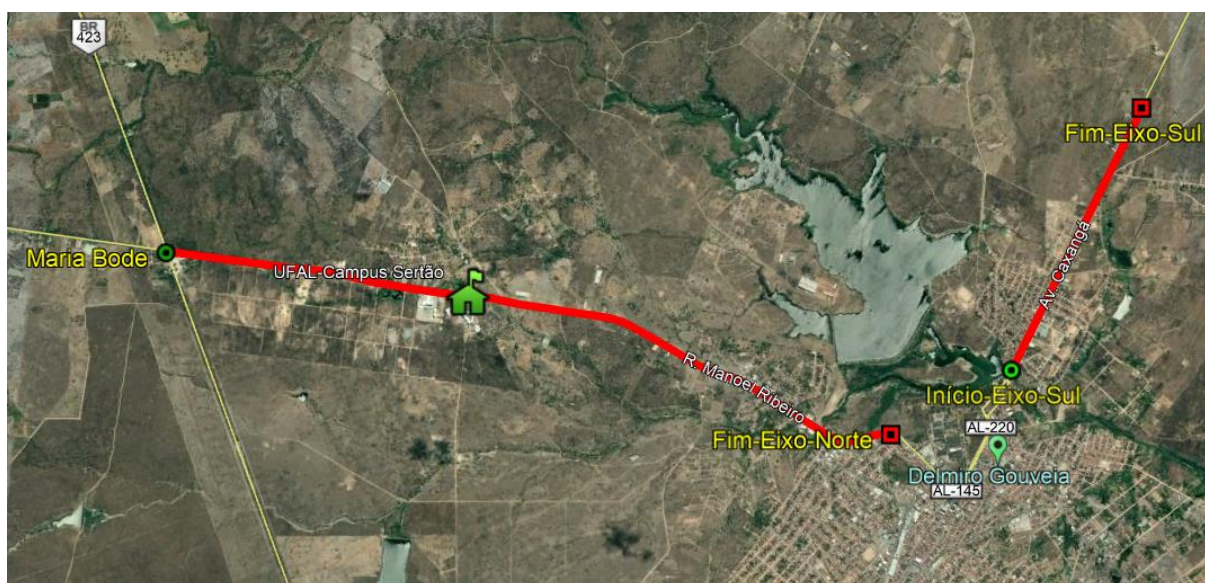
Fonte: MeDiNa (2018)

5. AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO DA DUPLICAÇÃO PELO MEDINA

O objeto do estudo de caso é uma obra rodoviária de Melhoramento e Restauração dos acessos à cidade de Delmiro Gouveia-AL. Esse projeto rodoviário é dividido em duas partes. O eixo norte tem início no entroncamento com a rodovia federal BR-423 no povoado Maria Bode, 5,8 Km do centro da cidade. No eixo de acesso sul, a obra tem 2,2 Km de melhorias em rodovia, partindo da ponte sobre o riacho do Açude (Bairro Pedra Velha) até o futuro entroncamento da rodovia estadual AL-220. Na condição de obra de melhoramento o projeto aproveitará todo o traçado existente, e fará os devidos alargamentos para implementação da duplicação da via.

De acordo com as normas de Projeto Geométrico do DNIT, este projeto foi enquadrado técnica e economicamente nas características previstas para Rodovia Classe IA, tendo pista dupla de duas faixas de rolamento, cada uma com 3,50 m de largura e canteiro central variando de 1,00 m a 4,00 m de largura e passeio público lateral com largura de 1,50 m para cada lado.

Figura 5.1 – Localização da Rodovia



Fonte: Google Earth Pro (2018)

Neste capítulo o projeto de melhoramento será avaliado segundo o Método nacional de Dimensionamento de Pavimentos-MeDiNa. Para isso serão usadas informações do projeto básico, *Projeto de Engenharia para Melhoramento e Restauração de Rodovia da Rodovia AL-145, trecho: Entr. BR-423-Delmiro Gouveia-Entr. AL-220*. Esse projeto foi desenvolvido

em concordância com as normas do DNIT vigentes à época. Especialmente, seu projeto de pavimentação foi elaborado no atendimento do Método Empírico.

5.1. Apresentação do Projeto Básico de Pavimentação

- Classe da rodovia: IA;
- Extensão: 8,0 KM;
- Tempo de projeto: 10 anos;
- Ano um de abertura para o tráfego: 2011;
- Fim da vida de serviço: 2020.

5.1.1. Tráfego

A tabela abaixo mostra os resultados de contagem feita pela empresa projetista.

Tabela 5.1 – Contagem de tráfego da rodovia

Tipo de veículo	Volume médio diário de tráfego	Percentual de tráfego	
		Total	Comercial
Carro de passeio e utilitário	48	31,58	-
Ônibus	22	14,47	21,15
Caminhão médio	35	23,03	33,65
Caminhão pesado	28	18,42	26,93
Reboque e semi-reboque	19	12,5	18,27
Total	152	100	100

Fonte: Projeto Básico, 2009

Foram feitas algumas estimativas para o crescimento do tráfego na região, em progressão geométrica, quais sejam:

- I. Adotou-se o crescimento do tráfego, a taxa anual de 2%, em função da estimativa do aumento populacional;
- II. Adotou-se o crescimento do tráfego, a taxa anual de 3%, para o turismo, fato esse já comprovado em regiões similares do Nordeste;
- III. Adotou-se um coeficiente $k = 1,5$ correspondente aos tráfegos gerado e desviado a ser adicionado ao tráfego atual, em face do Estudo de Viabilidade realizado no Nordeste (o DNIT recomenda $k > 1$);

- IV. Admitiu-se um aumento do número de veículo, do tipo carro de passeio e ônibus (respectivamente 100 e 18 a serem adicionados aos valores atuais) em função do início das atividades do Campus Universitário, instalado no local da obra.

Dentro da avaliação de cada cenário para previsão do número N, tomou-se aquele que conduziu ao maior número de operações do eixo padrão, segue resultado abaixo:

Tabela 5.2– Resultado do número de operações do Eixo Padrão Rodoviário

ANO		Valor de N	
Calendário	Projeto	Tráfego	
		Total	Comercial
2011	1	$0,7 \times 10^5$	$0,7 \times 10^5$
2015	5	$4,5 \times 10^5$	$4,5 \times 10^5$
2029	10	$1,3 \times 10^6$	$1,3 \times 10^6$

Fonte: Projeto Básico (2009)

5.1.2. Materiais de Pavimentação

❖ Estudos de Subleito

Em virtude da topografia e do greide de projeto o subleito foi feito totalmente de aterro. Para execução do mesmo usado um solo pertencente ao grupo A-2-4 (60%), e um solo pertencente ao grupo A-4 (40%), da classificação T.R.B., mais precisamente, uma areia siltosa e um silte, ambos com pouca plasticidade, apresentando um CBR mínimo, para dimensionamento do pavimento, igual a 10%, após quatro dias de imersão e com expansão máxima de 0,2% (insignificante).

❖ Sub-base

Duas áreas de jazidas foram destinadas à camada de sub-base e mais duas áreas destinadas à camada de base, todos para serem estabilizados granulometricamente, sem mistura.

O material destinado à camada de sub-base, em ambas as ocorrências (Acesso Norte e Acesso Sul), foi constatada a presença única do solo A-2-4, da classificação T.R.B., mais precisamente uma areia siltosa sem plasticidade, IG=0, apresentando CBR mínimo de 31 %, após quatro dias de imersão e com expansão máxima de 0,1% (insignificante).

❖ Base

No material usado na camada de base do pavimento, em ambas as ocorrências (Acesso Norte e Acesso Sul), foi constatada a presença única do solo A-1, da classificação T.R.B., enquadrado na Faixa “D” do DNIT, mais precisamente um pedregulho com areia, sem qualquer plasticidade, IG=0, apresentando CBR mínimo de 66%, após quatro dias de imersão e sem qualquer expansão.

❖ Especificações do CBUQ

MATERIAL BETUMINOSO

Será empregado o cimento asfáltico de petróleo de penetração 50-70, (CAP 50-70).

AGREGADO

Graúdo- O agregado graúdo será pedra britada de diâmetro máximo igual a $3/4"=19,1\text{mm}$;

Miúdo- O agregado miúdo será constituído de pó-de-pedra e areia lavada;

Material de Enchimento (filler) - O filler será pó calcário.

COMPOSIÇÃO DA MISTURA

A composição da mistura seca deverá apresentar curva granulométrica enquadrada na faixa "C" do DNIT, e terá os seguintes percentuais:

Tabela 5.3– Composição da Mistura Asfáltica

Materiais constituintes		
Brita com $\varnothing = 3/4"=19,1\text{mm}$	56 % ou $\varnothing 1/2$	55 %
areia lavada.	36 %	36 %
Filler	2 %	2,5 %
CAP 50-70	6 %	6,5 %

Fonte: Projeto básico (2009)

❖ Estrutura do Pavimento

Utilizando do procedimento descrito no item (3.3) o projeto básico propõe a seguinte configuração de estrutura de pavimento.

A estrutura da rodovia tem a seguinte configuração:

Tabela 5.4 - Estrutura do pavimento, que consta no projeto básico, obtida por meio do método DNER

Camada	Material	CBR	Espessura (cm)
Revestimento	CBUQ	-	04,0
Base	Pedregulho com areia	66%	20,0
Sub-Base	Areia siltosa	31%	15,0
Subleito	Areia siltosa e silte	10%	∞

Fonte: Projeto Básico (2009)

5.2. Análise do Projeto de Pavimentação com o MeDiNa

5.2.1. Classificação da rodovia

Conforme o manual de projeto geométrico do DNIT, essa rodovia é classificada em Sistema Arterial Primário. Com base nessa classificação o MeDiNa avalia a estrutura sob um nível de confiabilidade de 85% e com os seguintes limites de vida de serviço:

- Área trincada admissível no fim da vida de serviço é 30%;
- Deformação permanente total máxima de 13 mm.

5.2.2. Caracterização do Tráfego

Como explicado anteriormente, a caracterização da solicitação do tráfego no MeDiNa usa a mesma metodologia do método DNER, o número de operações do eixo padrão N. Assim, a caracterização do tráfego é $1,3 \cdot 10^6$ operações do eixo padrão num sentido da via. Se tratando de uma rodovia duplicada é preciso considerar ainda que os veículos se distribuem entre as duas faixas de cada sentido. Conforme mostrado na tabela (3.2) para rodovias duplicada (4 faixas de tráfego) será considerado que a faixa de projeto conta com 35% dos veículos que trafegam nos dois sentidos da rodovia.

5.2.3. Caracterização dos materiais

Conforme já dito, os materiais de pavimentação apresentam um comportamento mecânico não linear. Nessa avaliação, seus comportamentos serão tomados simplificadaamente como elasto-linear, seus Módulos de Resiliência serão assumidos como constantes.

A obtenção do Módulo de Resiliência, Coeficiente de Poisson, Curva de fadiga e coeficientes de deformações permanente, necessários a simulação no MeDiNa, precisam dos ensaios de laboratórios. Nesse estudo, devido a incapacidade de realizar ensaios, as

propriedades dos materiais serão tomadas do banco de dados do próprio MeDiNA e de bibliografias tal quais as mostradas nas tabelas (4.1) e (4.2).

❖ Material asfáltico

Para especificar o MR do material asfáltico usaremos a informação do seu tipo de ligante, CAP 50-70 e a sua granulometria como em tabela (5.4)

Tabela 5.5– Propriedades mecanicistas empíricas do revestimento asfáltico

Revestimento Asfáltico		Referência	
MR(MPa)	3.500		Soares et al. (2000)
Poisson	0,3		Quadro (4.2)
Curva de Fadiga	K1	K2	MeDiNa (2018)
	$1,0 \cdot 10^{-12}$	-3,599	

Fonte: Autor (2018)

❖ Material de solos

I. BASE-Pedregulho com areia

Tabela 5.6– Propriedades mecanicistas empíricas da camada de Base.

Camada de base				Referência		
MR(MPa)	400				Soares et al. (2000)	
Poisson	0,35				Quadro (4.2)	
Deformação Permanente	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_3	MeDiNa (2018)	
	0,27	-0,14	1,33	0,06		

Fonte: Autor (2018)

II. SUB-BASE-Areia Siltosa

Tabela 5.7– Propriedades mecanicistas empíricas da camada de Sub-Base.

Camada de base				Referência		
MR(MPa)	248				MeDiNa (2018)	
Poisson	0,45				MeDiNa (2018)	
Deformação Permanente	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_3	MeDiNa (2018)	
	0,453	-0,186	1,084	0,058		

Fonte: Autor (2018)

III. SUB-LEITO-Areia Siltosa e Silte

Tabela 5.8– Propriedades mecanicistas empíricas do Subleito.

Subleito					Referência
MR(MPa)	$MR = 14 \cdot CBR^{0,7} = 14 \cdot 10^{0,7} = 70,16\text{MPa}$				Tabela (4.1)
Poisson	0,45				MeDiNa (2018)
Deformação Permanente	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_3	MeDiNa (2018)
	0,244	0,419	1,309	0,069	

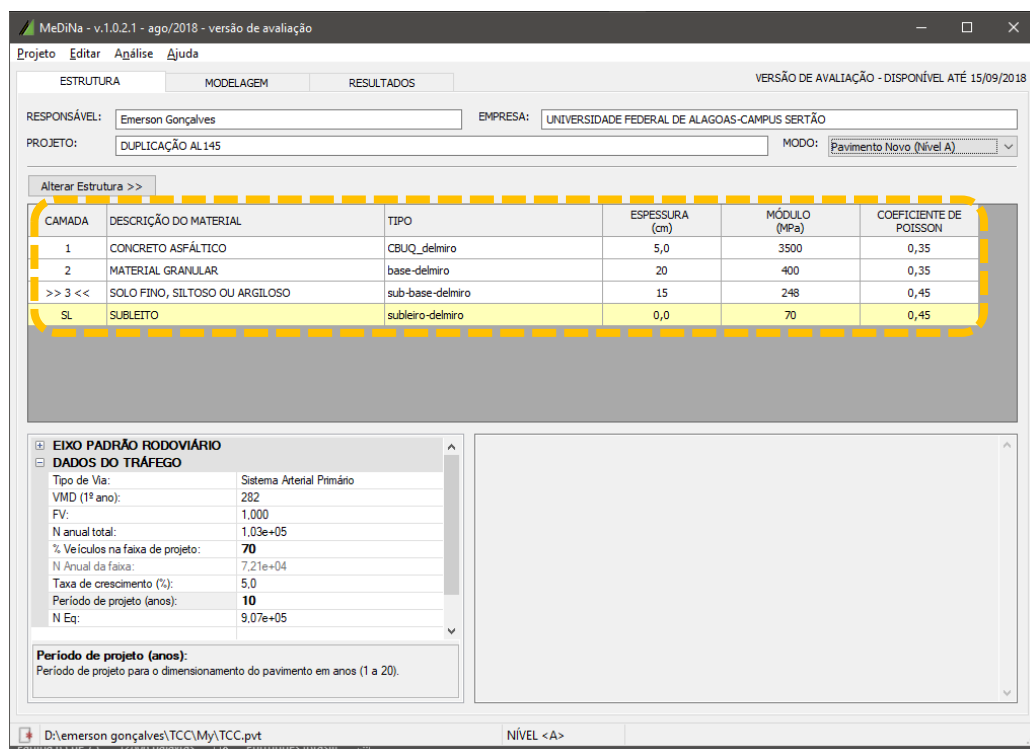
Fonte: Autor (2018)

5.2.4. Análise dos resultados

❖ Configuração da Estrutura Implementada no MeDiNa

A figura (5.2) mostra em resumo a configuração da estrutura implementada no MeDiNa. Vale observar que a espessura do revestimento asfáltico definido no projeto básico com 4,0 cm não pode ser implementada no MeDiNa, conforme mencionado na seção (4.7). Assim foi adotado para avaliação a espessura imediatamente mínima admitida.

Figura 5.2 - Tela do MeDiNa com estrutura implementada

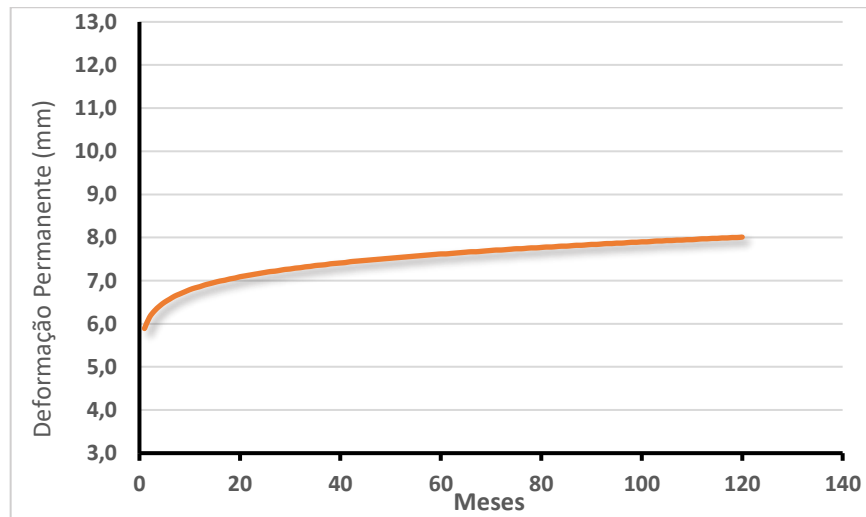


Fonte: MeDiNa, 2018

❖ Área Trincada e Deformação Permanente

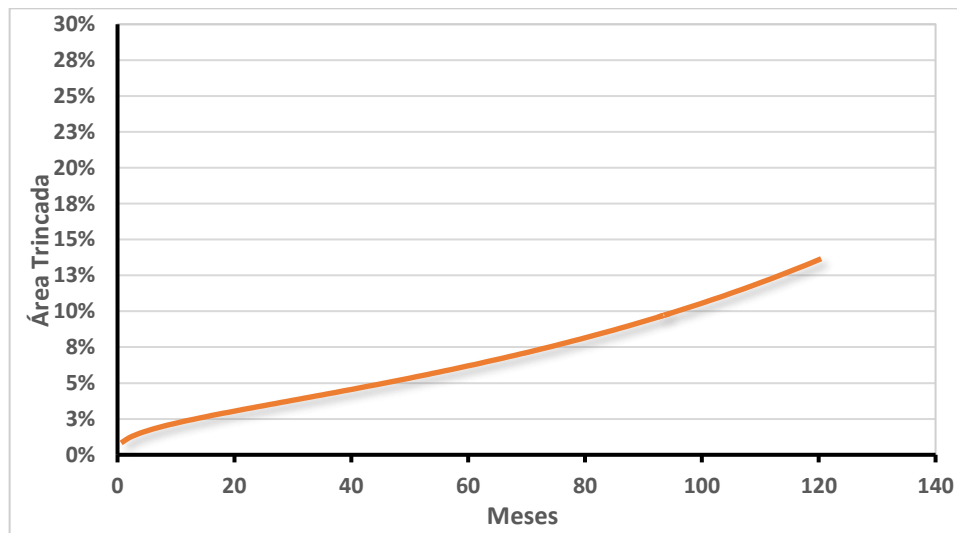
A análise da estrutura do pavimento feita pelo MeDiNa aponta que a estrutura proposta no projeto básico está suficiente dimensionada. Os valores de área trincada e deformação permanente ficaram abaixo dos seus limites máximos de tolerância.

Figura 5.3 - Gráfico Evolução da Deformação Permanente.



Fonte: Autor (2018)

Figura 5.4- Gráfico Evolução da Área Trincada.



Fonte: Autor (2018)

A área trincada prevista para 10 anos de serviço será de 13,6%. Como mostra a figura (5.9) esse valor está abaixo do limite máximo permitido de 30%. A deformação permanente total prevista ao fim dos 10 anos de serviço é de 8,0 mm, abaixo do limite máximo de 13,0 mm

gráfico (5.8). A tabela (5.9) mostra ainda a deformação permanente em cada camada do pavimento.

Tabela 5.9 – Deformação Permanente

Camada	Deformação Permanente (mm)
Concreto Asfáltico	0,00
Base	3,65
Sub-base	2,88
Subleito	1,48
TOTAL	8,0

Fonte: Autor (2018)

❖ FLOW NUMBER MÍNIMO

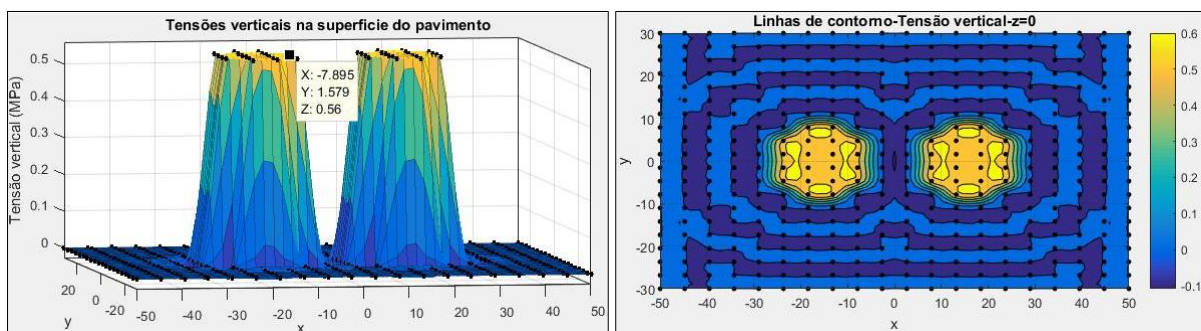
Como dito anteriormente, a deformação permanente no revestimento asfáltico é tomada como zero. No entanto para que isso realmente aconteça é preciso que o revestimento asfáltico tenha o seguinte Flow Number:

- Condição de Tráfego Normal: ≥ 100 ciclos
- Condição de Tráfego Severa: ≥ 300 ciclos

O projeto básico não traz informações sobre o Flow Number. Assim não se pode fazer considerações a respeito disso.

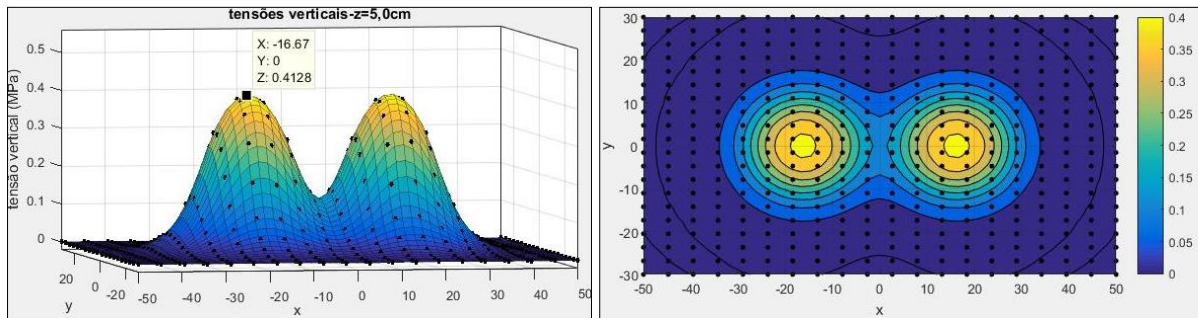
❖ Tensões no Interior do Pavimento

Figura 5.5 - Diagrama de tensões verticais na superfície do pavimento -Z=0.



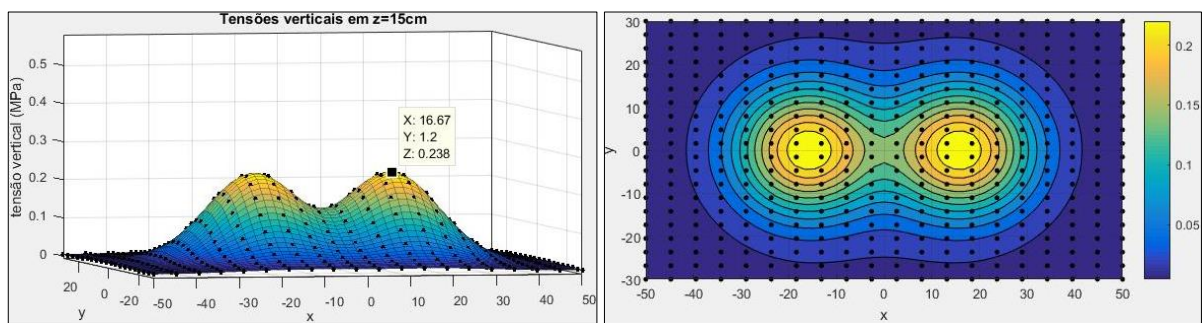
Fonte: Autor (2018)

Figura 5.6 - Diagrama de tensões verticais na superfície inferior do revestimento asfáltico-
Z=5cm.



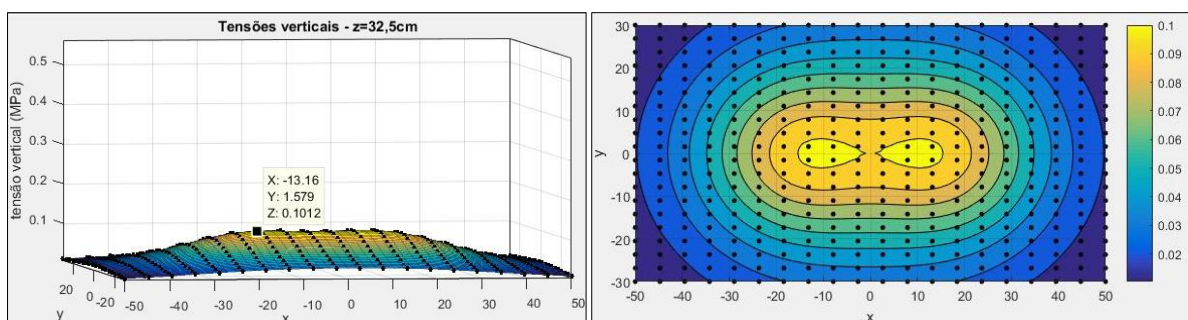
Fonte: Autor (2018)

Figura 5.7 - Diagrama de tensões verticais no meio da camada de base - Z=15cm



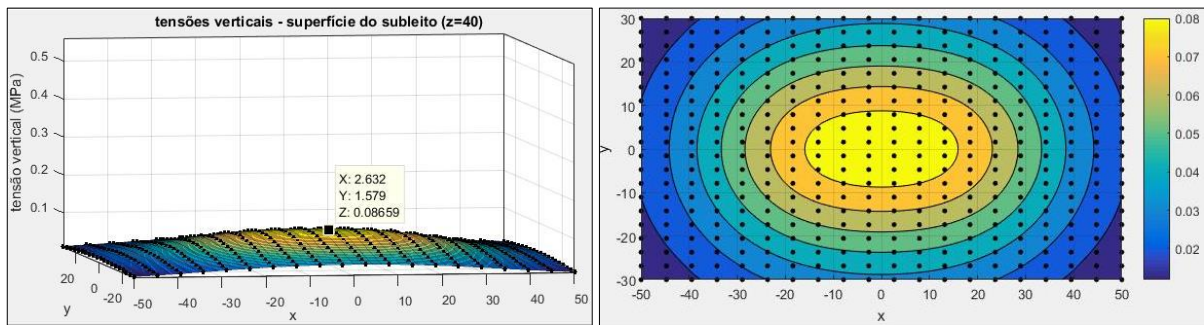
Fonte: Autor (2018)

Figura 5.8 - Diagrama de tensões verticais no meio da camada de sub-base -Z=32,5cm.



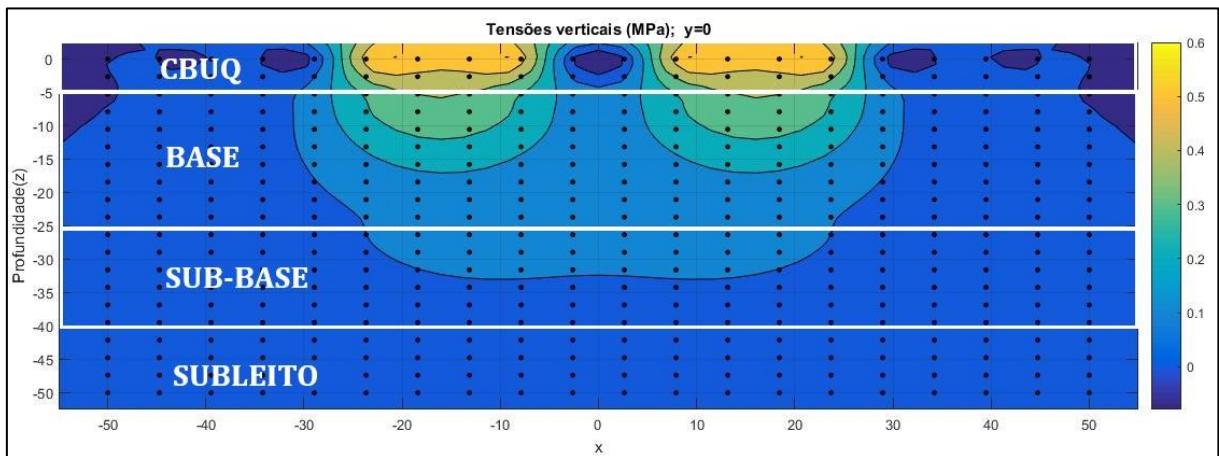
Fonte: Autor (2018)

Figura 5.9 - Diagrama de tensões verticais na superfície do subleito - Z=40cm.



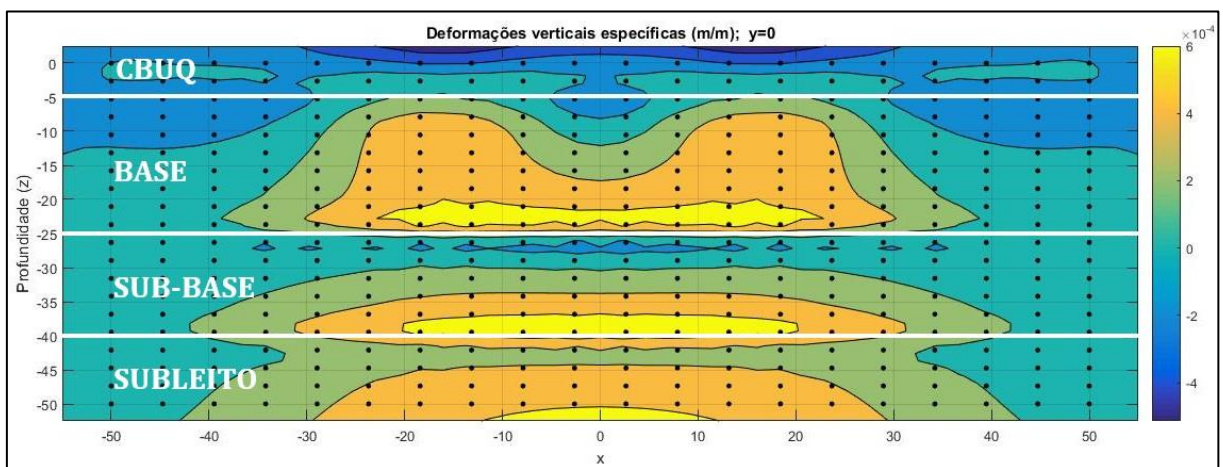
Fonte: Autor (2018)

Figura 5.10– Diagrama de tensões verticais, plano y=0



Fonte: Autor (2018)

Figura 5.11- Diagrama de deformações elásticas verticais específicas, plano y=0



Fonte: Autor (2018)

Os diagramas do estado de tensões apresentados permitem as seguintes observações:

- Dos 0,56 MPa de tensão vertical que solicitam a estrutura do pavimento, apenas 15% chega a superfície do subleito, 0,08659MPa;
- As deformações elásticas verticais que ocorrem na camada de revestimento asfáltico são muito pequenas, o que corrobora o seu desprezo na investigação das deformações permanentes;
- A camada de Base sofre as maiores deformações elásticas, isso também vai na direção dos resultados de deformações permanente que apontou a camada de base como a mais deformada ao longo da vida de serviço da rodovia.

5.3. Considerações adicionais

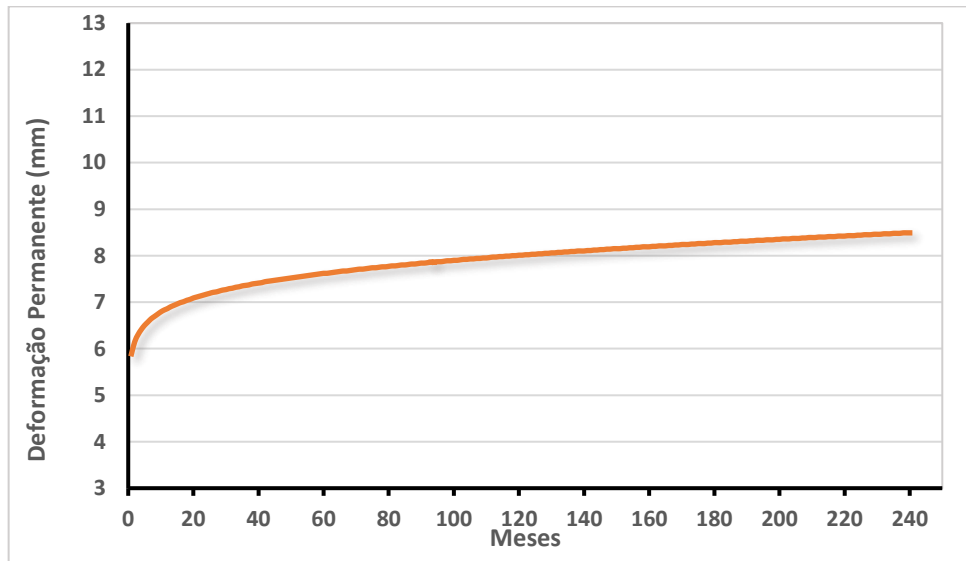
Desfrutando da automatização no processo de análise oferecido pelo MeDiNa, o projetista ganha a prerrogativa de poder fazer diversas simulações em seu projeto de pavimentação. A exemplo de:

- Estabelecer uma configuração de pavimento- espessuras e materias em cada respectiva camada- e como resultado, o tempo de serviço que essa estrutura suporta o tráfego solicitante.
- Fixar o tráfego e tempo de serviço, e encontrar a estrutura mínima suficiente;
- Avaliar o arranjo das camadas e descobrir qual a melhor solução econômica.

5.3.1. Avaliação de vida de serviço máxima

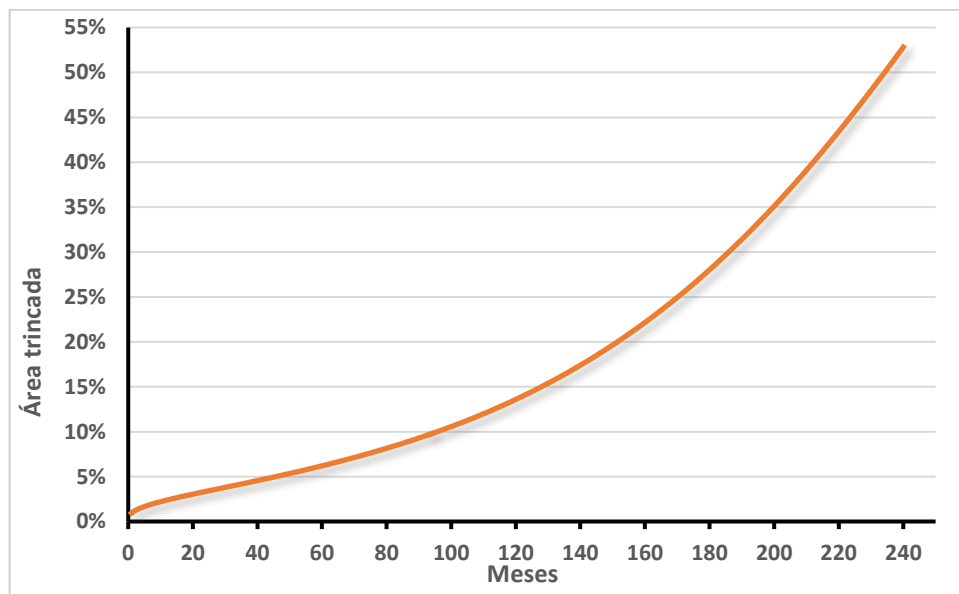
Os resultados apresentados mostram uma folga considerável entre os danos estimados e os danos limites máximos admitidos. Isso sugere que a estrutura pode suportar um número de operações do Eixo Padrão Rodoviário maior, em outras palavras, uma vida de serviço superior aos 10 anos do projeto real. O programa MeDiNa admite avaliações de rodovias com vida de serviço de até 20 anos. As figuras (5.12) e (5.13) mostram os resultados da previsão de danos durante 20 anos.

Figura 5.12- Gráfico Evolução da Deformação Permanente



Fonte: Autor (2018)

Figura 5.13- Gráfico Evolução da Área Trincada



Fonte: Autor (2018)

Com base nesses dados, o pavimento suporta aproximadamente 15 anos de tráfego. A deformação permanente se mantém dentro do admissível durante os 20 anos, no entanto o percentual de área trincada atinge o valor máximo de 30% aos 196 meses de serviço.

5.3.2. Redimensionamento da estrutura do pavimento

Além de indicar uma vida de serviço maior que os 10 anos, a robustez da estrutura proposta no projeto básico sugere a possibilidade de uma otimização nas camadas dos materiais

e assim fazê-las mais delgadas. Até então, a partir de uma estrutura estabelecida foi avaliado os danos causados pela passagem do eixo padrão dentro de uma vida de serviço. O programa MeDiNa também conta com o recurso de dimensionamento de camada. Neste, o programa retorna a espessura mínima que atende as condições de dano máximo admitidos e a vida de projeto fixada.

A tabela (5.10) mostra os resultados da otimização da estrutura com os mesmos materiais e para uma vida de serviço de 10 anos. A camada de base pode ser reduzida pela metade e a sub-base ficou 5 cm mais fina. Os resultados dos danos, sugerem ainda que o critério usado pelo programa para estabelecer essas espessuras foi a espessura mínima executável de camada de solos, 10cm.

Tabela 5.10- Otimização da estrutura com o MeDiNa

Camada		Espessura (cm)
Revestimento asfáltico-CBUQ		5,0
Base		10
Sub-Base		10
Danos	Deformação Permanente	7,1 mm
	Área Trincada	24,8%

Fonte: Autor (2018)

5.3.3. Avaliação econômica dos resultados

As conclusões do redimensionamento da estrutura apresentados na tabela (5.10) impelem a necessidade de uma avaliação monetária da informação.

Tabela 5.11- Redução das camadas de solos

Camada	Valor Inicial (cm)	Valor Final (cm)	Redução (cm)	Redução Percentual (%)
Base	20	10	10	50
Sua-Base	15	10	5	33,3

Fonte: Autor (2018)

Segundo a Carta Proposta vencedora do processo licitatório CONCORRÊNCIA Nº 05/2012, emitido à Comissão Permanente de Licitações de Obras e Serviços de Engenharia do Estado de Alagoas-CPL/AL, datado de 09 de abril de 2012, o preço total para execução de todos os serviços ou obras previstas foi de R\$ 7.364.162,70. Os preços referentes as camadas de Base e Sub-base apresentados na Carta Proposta são mostradas abaixo na tabela (5.12).

Tabela 5.12- Custo dos matérias de base e sub-base

Camada	Unidade	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Base	m ³	14.836,8	16,3	241.839,84
Sub-Base	m ³	8.058,9	15,27	123.059,40

Fonte: Autor (2018)

Aplicando a redução de 50 e 33% no preço total da camada de Base e Sub-Base respectivamente, temos o seguinte preço total da obra:

Tabela 5.13-Resultados da avaliação monetária

Camada	Preço Total (R\$)	Desconto (%)	Desconto (R\$)	Preço Final (R\$)
Base	241.839,84	50	120.919,92	120.919,92
Sub-Base	123.059,40	33,3	41.019,9	82.039,8
Total	-	-	161.939,82	202.959,72

Fonte: Autor (2018)

Assim o preço total da obra poderia ser reduzido em mais de 160 mil reais. Isso representa uma redução de 2,2% do preço global da obra. Em uma obra rodoviária maior, isso poderia significar milhões em economia, e talvez ser decisivo para viabilizar economicamente o projeto. A simples redução nas espessuras das camadas, já concederia um tempo de execução reduzido. A obra ficaria pronta mais cedo e inclusive requerendo menor tempo de interdição das vias para os trabalhos de execução. Vários benefícios à população atendida pela rodovia.

6. CONCLUSÕES

A estrutura do pavimento da duplicação da AL-145, dimensionada pelo método empírico também atende aos critérios limites de dimensionamento mecânico empírico do Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos. Em contrapartida o MeDiNa indicou uma possibilidade de otimização da estrutura no que diz respeito a sua espessura de projeto.

A oportunidade de otimização da estrutura analisada se apresenta como a conclusão mais interessante desse trabalho, pois exemplifica que diferentes técnicas de dimensionamento, ainda que façam uma concepção suficiente, podem conduzir a estruturas consideravelmente distintas, sobretudo no seu custo. E nessa busca por eficiência e suficiência de previsão, os métodos mecânicos aparentam levar significativa vantagem sobre os ditos empíricos.

Os resultados apresentaram um padrão. Os danos por área trincada ditaram a vida de serviço do pavimento. Essa conclusão corrobora as informações apresentadas no item (3.4), rara ocorrência de afundamentos em trilha de roda no Brasil.

Durante a manipulação do software e a avaliação de diferentes MR, observou-se uma sensibilidade significativa dos resultados a variações dessa propriedade elástica. Os danos de deformação permanente e área trincada são inversamente proporcionais ao MR. Isso indica que estruturas mais rígidas resistem melhor aos danos.

Um dos conceitos mais básicos da ideia de pavimento é que a sua estrutura absorva altos esforços concentrados e entregue ao terreno natural tensões brandas e distribuídas. A aplicação da teoria da elasticidade como solução para determinar o estado de tensões no interior do pavimento é a grande essência do método mecanicista empírico, conforme pode-se observar nas figuras (5.5– 5.11). A completude dos resultados oferecidos pelo MeDiNa, concede ao projetista apuradas faculdades qualitativas e quantitativas para confeccionar rodovias duráveis e econômicas.

Os resultados da avaliação econômica mostraram uma possibilidade significativa de economia na estrutura do pavimento da duplicação da AL-145, caso tivesse sido dimensionado usando o MeDiNa. Essas oportunidades precisam da devida atenção, sobretudo pela importância estratégica que obras de infraestrutura representam para o país.

Vale lembrar que o MeDiNA está em fase de avaliação, para posterior homologação pelo IPR/DNIT e pelo Ministério dos Transportes e assim tornar-se método oficial de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil.

REFERÊNCIAS

- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Ed. Oficina de textos, 2007.
- BARROS, L. M. **Deformação Permanente de Misturas Asfálticas: Avaliação do Desempenho Conforme Critério de Flow Number de Misturas Quentes e Mornas**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RJ, Brasil, 2017.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens-DNIT. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos**. Publicação IPR 704. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, 1998.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 134-ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR – 719. Rio de Janeiro, 2017.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens-DNIT. **Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais**. Publicação IPR 706. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, 1999.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT (Norma em fase de consulta pública) -ME: Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral a tensão controlada –Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2017.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT (Norma em fase de consulta pública) -ME: Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2017.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT (Norma em fase de consulta pública) -ME: Pavimentação - Misturas granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 135-ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 141-ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. **ACÓRDÃO Nº 328/2013–TCU–Plenário**. Brasília. 2013.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006.

COUTINHO, J.C.P. **Dimensionamento de Pavimento Asfáltico: Comparação do Método do DNER com um Método Mecânico - Empírico aplicada a um trecho**. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP, Ouro Preto, Brasil, 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES-CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**. Brasília, CNT, 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES-CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial**. Brasília: CNT : SEST : SENAT, 2017.

DAROUS, J. **Estudo comparativo entre sistemas de cálculo de tensões e deformações utilizados em dimensionamento de pavimentos asfálticos novos**. Dissertação de M.Sc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

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

FRANCO, F.; VIEIRA A.; SILVA C. **Considerações sobre o dimensionamento do revestimento asfáltico no Brasil e sua relação com a degradação prematura de pavimentos**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Pavimentação, 2016.

FRITZEN, M.A. **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos**. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos**. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecânico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Convênio UFRJ/DNIT**. Disponível em <<http://ipr.dnit.gov.br/pesquisa>>. Acesso em: 15 setembro de 2018.

LEKARP, F.; ISACSSON, U. e DAWSON, A., 2000a. **State of the art. I: resilient response of unbound aggregates**, Journal of Transportation Engineering ASCE, Vol. 126 (1), pp. 66-75, Jan/Feb.

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

MOTTA, L.M.G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.

MONISMITH, C. L. **Evolution of long-lasting Asphalt Pavement Design methodology: A perspective**. Alabama: Auburn University, 2004.