



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**SILVELÂNDIA SILVEIRA DOS SANTOS**

**ANÁLISE DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO DE UM PAVIMENTO EM SERVIÇO À  
LUZ DA VIDA DE FADIGA.**

**FORTALEZA  
2021**

SILVELÂNDIA SILVEIRA DOS SANTOS

ANÁLISE DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO DE UM PAVIMENTO EM SERVIÇO À LUZ  
DA VIDA DE FADIGA.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Engenharia Civil do  
Centro Universitário Christus, como requisito  
parcial para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Lucas Cavalcante de  
Almeida.

FORTALEZA  
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Centro Universitário Christus - Unichristus  
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do  
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237a Santos, Silvelândia Silveira dos.  
Análise de tensão e deformação de um pavimento em serviço à luz  
da vida de fadiga. / Silvelândia Silveira dos Santos. - 2021.  
63 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro  
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,  
Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Me. Lucas Cavalcante de Almeida.

1. Pavimentos flexíveis. 2. AEMC. 3. Tensão-deformação. 4.  
Fadiga. 5. Deformação. I. Título.

CDD 624

SILVELÂNDIA SILVEIRA DOS SANTOS

ANÁLISE DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO DE UM PAVIMENTO EM SERVIÇO À LUZ  
DA VIDA DE FADIGA.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Engenharia Civil do  
Centro Universitário Christus, como requisito  
parcial para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Lucas Cavalcante de  
Almeida.

Aprovado em 08/12/2021

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Lucas Cavalcante de Almeida  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Prof. Me. Fernando Dácio de Almeida  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Profa. Ma. Leila Maria Coelho de Carvalho  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

## RESUMO

No Brasil, mais de 90% das rodovias pavimentadas são constituídas por pavimento flexível. O dimensionamento de pavimento é normatizado pelo método empírico do DNIT desde 1966, porém, se tornou muito defasado diante tantas variáveis atuais e atuantes num pavimento. Com o avanço da tecnologia, foi desenvolvido por método computacional mecanístico empírico o *software* MeDiNa, que veio com suporte e, em meados de 2020, como método auxiliar implantado pelo DNIT, sendo assim oferecendo mais rapidez, liberdade na escolha de material, melhor adequação a cada projeto e maior confiabilidade nos resultados. O MeDiNa possui três *softwares* em conjunto: O AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) que analisa tensão-deformação e deslocamentos, o BackMeDiNa, responsável pela retroanálise, e o MeDiNa, que verifica o dimensionamento do pavimento pelo método mecanicista. O presente trabalho avaliou um trecho pavimentado de 8,4 km que liga os municípios de Ladeira Grande à Maranguape, que precocemente apareceram defeitos em sua vida útil. Com o objetivo de analisar as tensões-deformações no revestimento, foi utilizado o *software* AEMC. No programa foram inseridos valores de Módulo de Resiliência, coeficiente *Poisson* que foram definidos a partir da seleção de solos cearenses em pesquisas científicas, espessura das camadas e a definição dos pontos que se quer analisar, que no caso é na base do revestimento para averiguar a fadiga por modelos equacionais com os valores obtidos de máxima tração na camada. Os defeitos mais comuns no pavimento em estudo são fadiga e trincas do tipo “couro de jacaré” no revestimento. Considerando que o número N simulado pelas equações de fadiga, em decorrência das deformações pelo método mecanicista, foi menor que o número N de projeto, que foi obtido pelo método empírico, resulta no correto dimensionamento do pavimento. Sendo assim, excesso de tráfego não é causa para os defeitos nesse estudo. Diante dos dados de análise destrutiva realizada no pavimento, observa-se que os defeitos podem ser causados por escolha inadequada do material ou má execução da camada de revestimento asfáltico e apresenta também baixo grau de compactação na camada de base, podendo ser agentes potentes para os defeitos.

**Palavras-chave:** Pavimentos flexíveis. AEMC. Tensão-deformação. Fadiga. Deformação.

## ABSTRACT

In Brazil, more than 90% of paved roads are made up of flexible pavement. The pavement dimensioning has been standardized by the DNIT empirical method since 1966, but it has become very outdated in face of so many current and active variables in a pavement. With the advancement of technology, the MeDiNa software was developed using an empirical mechanistic computational method, which came with support and in mid-2020, as an auxiliary method implemented by DNIT, thus offering more speed, freedom in the choice of material, better adaptation to each project, greater reliability in results. MeDiNa has three softwares together: AEMC (Multiple-Layer Elastic Analysis) which analyzes stress-strain and displacements, BackMeDiNa responsible for the retroanalysis and MeDiNa which checks the pavement design using the mechanistic method. The present work evaluated a paved stretch of 8.4 km that connects the municipalities of Ladeira Grande to Maranguape, which showed early defects in their useful life. In order to analyze the stress-strains in the coating, the AEMC software was used. In the program were inserted values of Resilience Modulus, Poisson coefficient that were defined from the selection of soils from Ceará in scientific research, layer thickness and the definition of the points to be analyzed, which in this case is at the base of the coating to verify the fatigue by equational models with the maximum tensile values obtained in the layer. The most common defects in the pavement under study are fatigue and “alligator leather” type cracks in the coating. The number simulated by the fatigue equations, as a result of deformations by the mechanistic method, was smaller than the design number  $N$ , which was created by the empirical method, resulting in the correct design of the pavement. Therefore, excess traffic is not the cause of the defects in this study. In view of the destructive analysis data carried out on the pavement, it is observed that the defects can be caused by an inadequate choice of material or poor execution of the asphalt coating layer and it also presents a low degree of compaction in the base layer, which can be potent agents for the defects.

**Keywords:** Flexible floors. AEMC. Stress-strain. Fatigue. Deformation

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
AASHTO	<i>The American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
CBR	Índice de Suporte Califórnia - CBR
USACE	Corpo de Engenheiros Militares dos EUA
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
<i>FWD</i>	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
VB	Viga Benkelman
MR	Módulo de Resiliência
DER/SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturas dos pavimentos.....	16
Figura 2 - Distribuição de tensões aplicada no pavimento.....	17
Figura 3 - Estrutura do pavimento flexível.....	17
Figura 4 - Esquema representativo das tensões, deformações e.....	18
Figura 5 - Treliça metálica para medida dos afundamentos em trilhas de roda.....	20
Figura 6- Deformação permanente ou plástica por camada de pavimento. ....	20
Figura 7 - Influência da temperatura nas características da mistura asfáltica.....	22
Figura 8 - Ensaio de fadiga em misturas asfálticas.....	23
Figura 9 - Principais defeitos no pavimento flexível.....	24
Figura 10 - Exemplo de extração de corpos-de-prova e de poços.....	29
Figura 11 - Trinca interligada do tipo couro de jacaré.....	30
Figura 12 - Afundamento de trilha de roda.....	30
Figura 13 - Esquema da viga Benkelman.....	32
Figura 14 - Medição em campo com viga Benkelman.....	32
Figura 15 - Esquema de medida e raio de curvatura.....	33
Figura 16 - Esquema de defletômetro de impacto.....	34
Figura 17 - Vista geral do FWD Dynatest.....	34
Figura 18 - Esquema de defletômetro de impacto.....	35
Figura 19 - Convenção de Eixos X,Y e Z.....	40
Figura 20 - Eixo padrão rodoviário de 8,2tf.....	41
Figura 21 - Localização da coleta de dados.....	43
Figura 22 - Trinca de couro de jacaré com o pavimento fadigado em pouco tempo de uso.....	44
Figura 23 - Pavimento trincado severamente.....	45
Figura 24 - Base com pouca brita.....	45
Figura 25 - Método de análise destrutiva nas camadas do pavimento. ....	46
Figura 26 - Situação recente do trecho em estudo.....	46
Figura 27 - Interface AEMC.....	47
Figura 28 - Fluxograma das etapas do trabalho. ....	48
Figura 29 - Descrição dos componentes do AEMC.....	50
Figura 30 - Esquema dos pontos de análise do pavimento no AEMC.....	50
Figura 31- Processamento do pavimento no AEMC - (Pavimento A).....	53
Figura 32 - Processamento do pavimento no AEMC - (Pavimento B).....	54
Figura 33 - Processamento do pavimento no AEMC - (Pavimento C).....	55
Figura 34 - Processamento do pavimento no AEMC - (Pavimento D).....	55

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e Desvantagens no uso da VB e do FWD .....	33
Quadro 2 - Unidades de grandezas físicas adotada para MeDiNa, AEMC e BackMeDiNa:.....	39
Quadro 3 - Quadro de variáveis utilizadas no AEMC.....	51
Quadro 4 - Valores Usuais de Módulo de Resiliência .....	52
Quadro 5 - Valores Usuais de Coeficiente de Poisson.....	52
Quadro 6 - Módulos de Resiliência adotados para o AEMC – (Pavimento A).....	53
Quadro 7 - Módulos de Resiliência adotados para o AEMC – (Pavimento B).....	54
Quadro 8 - Módulos de Resiliência adotados para o AEMC – (Pavimento C).....	54
Quadro 9 - Módulos de Resiliência adotados para o AEMC – (Pavimento D).....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos de equações para fadiga no revestimento .....	56
Tabela 2 - Dados de Deformação e MR dos pavimentos .....	56
Tabela 3 - Resultado de aplicação de equações de fadiga.....	57

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>14</b>
1.1.1.	<i>Objetivo Geral.....</i>	14
1.1.2.	<i>Objetivos Específicos.....</i>	14
<b>1.2.</b>	<b>Estrutura do Trabalho.....</b>	<b>15</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.</b>	<b>Classificação dos pavimentos.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.</b>	<b>Mecânica dos Pavimentos.....</b>	<b>17</b>
2.2.1.	<i>Módulo de Resiliência.....</i>	18
2.2.2.	<i>Deformação Permanente.....</i>	19
2.2.3.	<i>Fadiga.....</i>	21
<b>2.3.</b>	<b>Defeitos do pavimento.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.</b>	<b>Métodos de avaliação estrutural em pavimentos asfálticos.....</b>	<b>28</b>
2.4.1.	<i>Avaliação estrutural destrutiva.....</i>	28
2.4.2.	<i>Avaliação estrutural não destrutiva.....</i>	29
2.4.3.	<i>Retroanálise.....</i>	30
2.4.3.1.	<i>Viga Benkelman (VB).....</i>	31
2.4.3.2.	<i>Equipamento por impacto <i>falling weight deflectometer</i> (FWD).....</i>	33
<b>2.5.</b>	<b>Método de dimensionamento empírico.....</b>	<b>35</b>
<b>2.6.</b>	<b>Método de dimensionamento mecanístico empírico.....</b>	<b>36</b>
2.6.1.	<i>Softwares utilizados para o dimensionamento mecanístico empírico.....</i>	37
2.6.1.1.	<i>MeDiNa.....</i>	37
2.6.6.2.	<i>AEMC.....</i>	39
2.6.6.3.	<i>BackMeDiNa.....</i>	41
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1.</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>43</b>
3.1.2.	<i>Software utilizado - AEMC.....</i>	47
<b>3.2.</b>	<b>Método e análise de dados.....</b>	<b>47</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>49</b>
<b>4.1.</b>	<b>Utilizando o AEMC.....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.</b>	<b>Aplicando em Equações modelo de fadiga.....</b>	<b>56</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>5.1.</b>	<b>Análise estrutural do pavimento.....</b>	<b>58</b>

<b>5.2.</b>	<b>Fadiga no revestimento asfáltico .....</b>	<b>58</b>
<b>5.3.</b>	<b>Defeitos que surgiram no pavimento .....</b>	<b>58</b>
<b>5.4.</b>	<b>Proposta para trabalhos futuros .....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), os pavimentos são estruturas com sistema de camadas executadas sobre a terraplanagem que têm a função de resistir aos esforços aplicados pelo tráfego e as intempéries. É priorizado o conforto e segurança aos usuários da via, deste modo, atenta-se às melhorias das condições de rolamento que permitam um melhor trajeto para os veículos como, também, a economia e durabilidade do pavimento.

A taxa de pavimentação no Brasil é considerada baixa quando comparada a outros países. Segundo Confederação Nacional do Transporte - CNT (2019), apenas 12,4% (213.453 km) das rodovias brasileiras (federais, estaduais e municipais) do total de 1.720.700 km são pavimentadas. Nesta pesquisa, também foram analisados, aproximadamente, 6,3% (108.863 km) de rodovias pavimentadas e 59% (64.198 km) destas foram classificadas em condições inadequadas.

Sabendo que mais de 90% das rodovias brasileiras pavimentadas são constituídas por pavimento flexível (CNT, 2017), e que esse tipo de pavimento resiste bem para a finalidade quando devidamente dimensionado e bem utilizado nas condições de uso. Resistindo aos esforços adequadamente, são previsíveis o aparecimento de defeitos que devem ser sanados em manutenções, obedecendo sempre às premissas de conforto e segurança.

A larga utilização do pavimento flexível no Brasil tem sido cultural por diversos fatores, entre eles seu baixo valor de implantação comparado ao pavimento rígido, que é em média 42% mais caro. E, quanto à manutenção, é mais rápido. O tráfego é liberado assim que termina a intervenção, ao contrário do pavimento rígido que necessita esperar o tempo de cura do concreto. (FILHO; ROCHA, 2018).

Atualmente, no Brasil, para dimensionar um pavimento, é utilizado um método empírico desde 1966. Esse mecanismo foi elaborado e normatizado pelo extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), e atualizado em 1981, pelo Engenheiro Murilo Souza. Desenvolvido a partir de observações obtidas na pista experimental *The American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO junto ao método do Corpo de Engenheiros Militares dos EUA (USACE), que era utilizado no dimensionamento de pavimentos aeroportuários que sofreu uma adaptação para a pavimentação rodoviária.

Diante das adaptações e técnicas de estudo para o método DNER, foram atribuídos fatores de equivalência (reflete o dano causado por um eixo em análise ao comparar com o eixo padrão de 8,2 tf) e verificado o Índice de Suporte Califórnia - CBR (teste avaliativo da resistência do solo) para cada camada referente ao material aplicado. Tornando o trecho

calculado particular daquele tráfego pelo número N (número de repetições do eixo padrão na vida útil de projeto do pavimento) e condições climáticas. O método generaliza a situação tornando inflexíveis as variáveis. Por causa disso, aparecem defeitos não previstos em decorrência de alterações nas condições de cálculo. A CNT (2017) relatou em seu estudo, que o método de dimensionamento de pavimentos do DNER é ultrapassado e que, também, por essa razão tem somado falhas por falta de revisão técnica mais atualizada, quando a última foi em 1960 e desde lá muitos fatores importantes se modificaram.

O método DNER é o que rege por muito tempo a forma de calcular estruturalmente os pavimentos rodoviários no Brasil, porém, sentiu-se necessidade de ter uma forma de calcular mais assertiva. Com o avanço das tecnologias, foram intensivamente realizados estudos para mecanizar e graficamente ser capaz de atender mais variáveis nesse dimensionamento.

O DNIT (2006) sugere o método mecanístico empírico como análise complementar aos projetos de pavimentação. Assim, adicionando um fator de maior confiabilidade na escolha de materiais, por exemplo. Com a análise das propriedades, possibilidades de composição de camadas e influências, comportamento elástico do pavimento, já sendo possível dispor resultados mais confiáveis relacionado às variantes.

Um exemplo de programa computacional que auxilia na análise do pavimento pelo método mecanístico empírico é o *software* MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional). Além de sigla, é também homenagem ao professor Jackes de Medina, falecido em 2019. Ele é precursor da mecânica em pavimentos no Brasil. O *software* realiza um sistema de cálculo-resposta da estrutura sugerido pelos dados inseridos. Fornecendo valores de tensões, deformações e deflexões relativos aos anos de utilização da via, podendo ser analisado ao acumulado do tempo, a influência com o passar dos anos em função do material e camada escolhida para ser analisada.

O *software* MeDiNa é composto por três subdivisões de análises, resultante em três *softwares*: AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), que analisa tensão-deformação e deslocamentos, o BackMeDiNa, responsável pela retroanálise e o MeDiNa, que verifica o dimensionamento do pavimento pelo método mecanicista. Neste trabalho, será de grande contribuição a utilização do AEMC, ao inserir dados estruturais do pavimento em estudo como as espessuras, Módulos de Resiliências e coeficiente de Poisson de cada camada do pavimento, que a partir do processamento, fornecerá dados para cálculo do tráfego, por exemplo.

Em vista aos estudos realizados com o método mecanístico empírico, justifica esta pesquisa a confiabilidade que já fora aplicada com o método, que é mais realístico em contrapartida ao método empírico, com o DNIT, em meados de 2020, foi dado início o processo

de implantação do MeDiNa como método auxiliar para o dimensionamento de pavimentos em todo o território brasileiro, de maneira mais econômica, duradoura e podendo, também, analisar variáveis do material. O MeDiNa propicia maior liberdade de tentativas e variações, por fazer o estudo integrado entre todas as camadas do pavimento e readequação nas espessuras.

Ainda no estudo feito por CNT (2017), é relatado que o método DNER ainda que defasado, não é a causa primordial no desgaste precoce dos pavimentos das rodovias brasileiras. A nova composição da frota de veículos no tráfego, em especial os transportes de cargas, vem sobrecarregando os pavimentos. Os veículos atuais são mais robustos e preparados para carregarem uma maior carga, porém, o pavimento é preparado para suportar em condições que fora projetado.

Outro fator que pode estar diretamente ligado à durabilidade do pavimento, apontado pelo DNIT, é a qualidade da execução. Seja por falta de técnica dos executores contratados, como, também, displicência às normas técnicas de execução das rodovias. Planejamento e fiscalização são ações importantes para a qualidade do produto final.

Diante do exposto, este trabalho se embasa na análise de um trecho do pavimento em serviço localizado no Estado do Ceará, dimensionado pelo método empírico, que apresentou defeitos precocemente em sua vida útil. Adicionada a análise desse mesmo trecho, pelo método mecanístico empírico coletar valores de deformações no pavimento para avaliação do número N através de modelos de fadiga, e comparando os dois métodos a fim de constatar as possíveis causas para o surgimento do defeito de fadiga

## **1.1. Objetivos**

### *1.1.1. Objetivo Geral*

Analisar tensões e deformações por meio de dados provenientes de avaliação estrutural de um trecho de 8,4 km localizado na CE – 065, a fim de constatar a vida de fadiga do trecho.

### *1.1.2. Objetivos Específicos*

- ✓ Analisar dados estruturais de um trecho em serviço;
- ✓ Verificar a aplicabilidade das equações sobre fadiga do revestimento asfáltico;
- ✓ Analisar a partir das avaliações do pavimento em serviço os defeitos que surgiram no pavimento.

## 1.2. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme a descrição a seguir:

O Capítulo 1 é formado pela introdução do trabalho, contextualizando o tema, e mostrando a justificativa, em seguida os objetivos e estrutura do trabalho, esclarecendo o motivo da análise dos dois métodos de estudo na avaliação do pavimento ao apresentar defeitos em pouco tempo de vida útil.

O Capítulo 2 é composto pela revisão de literatura, que apresenta as definições estudadas ao longo da pesquisa, com uso de artigos, teses, dissertações, relatórios, manuais e documentos de agências regulamentadoras para pavimentação, contribuindo no esclarecimento dos métodos empírico e mecanístico empírico utilizados no estudo, diferença entre eles e o motivo pelo qual o mecanístico empírico tem ganhado mais espaço até ser implantado pelo DNIT, atualmente como método auxiliar para dimensionamento de pavimentos.

O Capítulo 3 se refere aos materiais e métodos da pesquisa, o *software*, planilhas eletrônicas, relatórios utilizados nos processos de análise dos dados em comparação aos métodos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados pelo método mecanístico empírico com a utilização do *software* AEMC para obtenção de tensões e deformações; e vida de fadiga do pavimento por meio de equações de modelo de fadiga para análise comparativa de dados.

Em síntese, o Capítulo 5 apresenta a conclusão retornando aos objetivos específicos e explicitando as dificuldades encontradas no processo da pesquisa, seguido das referências até aqui citadas e discutidas, que foram utilizadas para a realização deste trabalho.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

No capítulo de revisão de literatura, está disposta a base da pesquisa deste trabalho. No qual referencia-se as literaturas específicas e renomadas no campo do estudo de pavimentação asfáltica para justificar os elementos e questões propostas nesse trabalho com foco nos métodos de dimensionamento de um pavimento asfáltico na modalidade empírica e mecanística empírica.

### 2.1. Classificação dos pavimentos

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os pavimentos são classificados em:

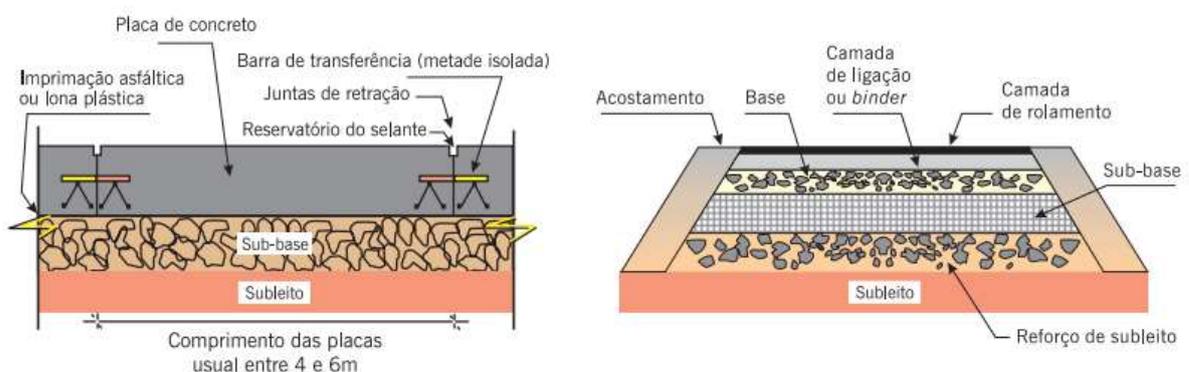
✓ **Flexível:** as camadas do pavimento se deformam elasticamente ao receber aplicação de carga que se transferem entre as camadas do pavimento. A camada de revestimento é composta de concreto asfáltico.

✓ **Semirrígido:** composto por uma base estabilizada quimicamente aderida por algum aglutinante cimento ou cal, formando a parcela rígida do sistema, com propriedades e cimentícias abaixo da camada asfáltica.

✓ **Rígido:** a sua camada rígida de revestimento e também estrutural absorve os impactos de forma a distribuir uniformemente os esforços para as outras camadas. Seu revestimento é composto por lajes de concreto Portland.

O comportamento estrutural é relacionado à interação entre as camadas, bem como a rigidez e espessura entre elas. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, tem-se os esquemas estruturais dos pavimentos rígido e flexível, e, na Figura 2, a deformação pela carga aplicada no pavimento.

Figura 1 - Estruturas dos pavimentos

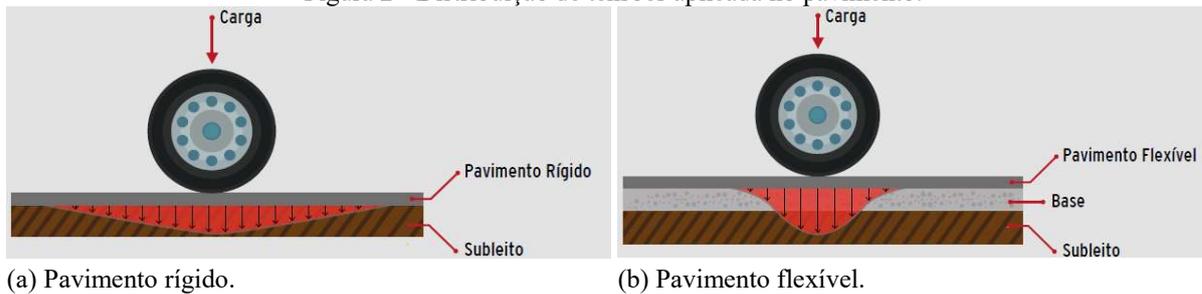


(a) Pavimento rígido (corte longitudinal).

(b) Pavimento flexível (corte transversal).

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

Figura 2 - Distribuição de tensões aplicada no pavimento.



(a) Pavimento rígido.

Fonte: CNT (2017)

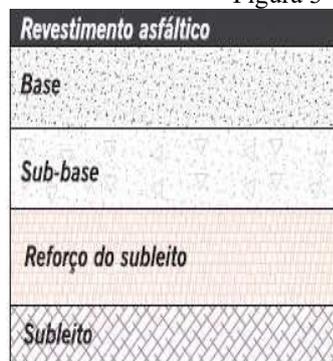
(b) Pavimento flexível.

Conforme Balbo (2007), a absorção dos esforços no pavimento flexível, objeto de estudo desse trabalho, acontece de forma distribuída entre camadas, sendo a mais externa, o revestimento, a que recebe as tensões verticais de forma mais concentrada.

Os pavimentos flexíveis, em sua grande maioria, estão relacionados a pavimentos asfálticos. O seu revestimento é formado por uma camada asfáltica superficial, a camada mais externa do pavimento e exposta aos agentes responsáveis por sua utilização. Apoiada sobre as camadas de base, sub-base e reforço de subleito, composta por materiais granulares, solos ou mistura de solos, sem adição de compostos cimentantes. (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Na Figura 3, é possível observar a composição das camadas de um pavimento flexível e a execução de revestimento asfáltico, respectivamente.

Figura 3 - Estrutura do pavimento flexível



(a) Estrutura do pavimento-tipo



(b) Revestimento asfáltico sendo executado.

Fonte: Bernucci *et al.*, (2010).

## 2.2. Mecânica dos Pavimentos

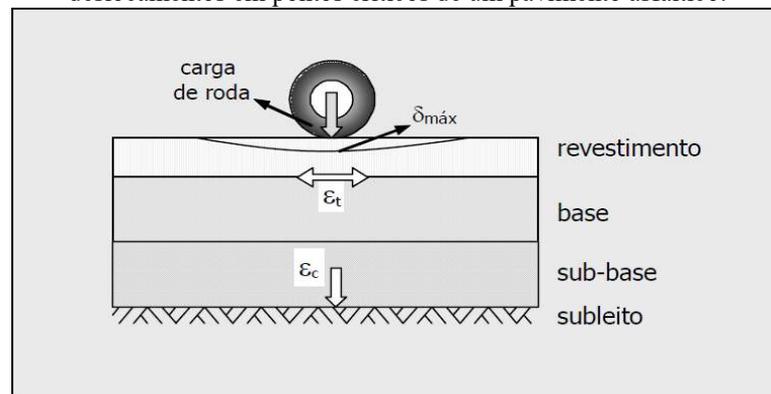
Conforme Spada (2003), em sua tese ele trata a mecânica dos pavimentos como modo resposta do pavimento a aplicação de carga repetida com variações de tensões, sendo essas tensões menor que a tensão de ruptura e análise das deformações elásticas e plásticas.

Medina foi o pioneiro nos estudos da mecânica dos pavimentos em 1976 na COPPE/UFRJ, instituiu a classificação de solos a partir das propriedades resilientes dos solos, podendo obter o estudo do comportamento mecânico quanto deformabilidade elástica.

Ao se projetar um pavimento, idealiza-se compor as camadas de suficiente rígida e espessura que resguardem o subleito e ao mesmo tempo garantam que as camadas não trinquem ou deformem de forma plástica. (SPADA, 2003).

Em um pavimento flexível asfáltico, pode-se representar a distribuição de carga no pavimento pela Teoria da Elasticidade, indicando as principais deformações e deslocamentos que atuam no interior da estrutura do pavimento, observa-se essa disposição na Figura 4. (FRANCO, 2007).

Figura 4 - Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos de um pavimento asfáltico.



Fonte: Franco (2007)

A partir das características da estrutura e materiais, módulo de resiliência e coeficientes de *Poisson* dos materiais e informação do tráfego atuante na estrutura, se tem capacidade de realizar cálculos pela teoria da elasticidade.

Nas pesquisas de Franco (2007) é possível observar as considerações para o dimensionamento de um pavimento. Os danos podem ser causados por deflexão máxima no topo da camada de revestimento, deflexão máxima no topo do subleito e dano de fadiga da camada asfáltica ou cimentada. Ao projetista é repassado o cálculo do acúmulo final de deformação permanente de toda a estrutura. Deste modo simplificar o dimensionamento já que é complexo o comportamento do pavimento por deformação permanente, podendo ocorrer variações na aplicação de carga no pavimento.

### 2.2.1. Módulo de Resiliência

Franco (2007) atenta que alguns fatores podem alterar o comportamento resiliente dos materiais, são eles: anisotropia ou não homogeneidade, pressão confinante, número de

repetições da tensão desvio, história de tensões, duração, tipo de agregado, graduação do material, umidade de compactação, entre outros.

Conforme Gondim (2008), o módulo de resiliência consiste em simular as ações do tráfego, em tentativa da real condição do pavimento quanto ao carregamento resistente. Ensaio capaz de indicar o comportamento do material sujeito à aplicação de repetidos ciclos de cargas.

E conforme o DNIT, o módulo de resiliência do material é a relação da tensão desvio aplicada repetidas vezes ( $\sigma_d$ ) e deformação resiliente axial recuperável correspondente ( $\epsilon_a$ ) daquele trecho em estudo, como apresenta a “Equação 1”.

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_a} \quad (1)$$

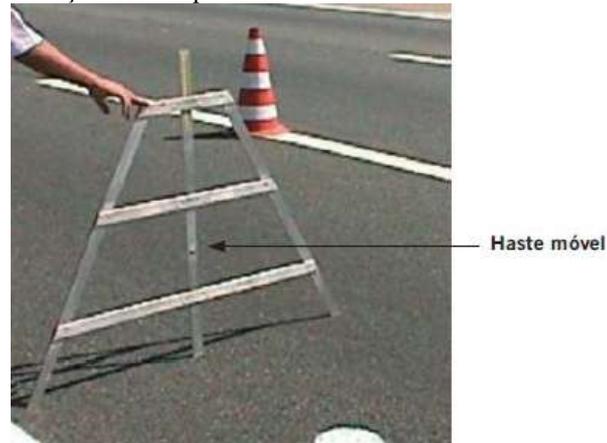
Bastos (2013) destaca que, analisar o solo em que o módulo de resiliência (MR) foi adquirido por compactação no ramo seco pode ser danoso, devido a influência da umidade que não será possível garantir que essa umidade se eleve. E caso ocorra o aumento da umidade, implica no possível declínio considerável do MR.

### 2.2.2. Deformação Permanente

Segundo Medina e Motta (2015), no Brasil, um dos defeitos mais frequentes é o trincamento da camada superior asfáltica. Que é causada pela flexão alternada da camada superficial apoiada em camadas granulares e esse arranjo das partículas são bastante deformáveis elasticamente. Comumente, acontecem as deformações permanentes em pavimento asfáltico quando eles são submetidos a altos esforços como em região da trilha de roda dos caminhões na estrada, em corredores de ônibus urbanos, que causam deformações permanentes. No dimensionamento do pavimento, é para ser capaz de resistir a essa deformação a partir do número N e à ação climática em consideração.

Na Figura 5, se vê uma treliça padronizada com 120 cm de base para medição de deformações permanentes.

Figura 5 - Treliza metálica para medida dos afundamentos em trilhas de roda



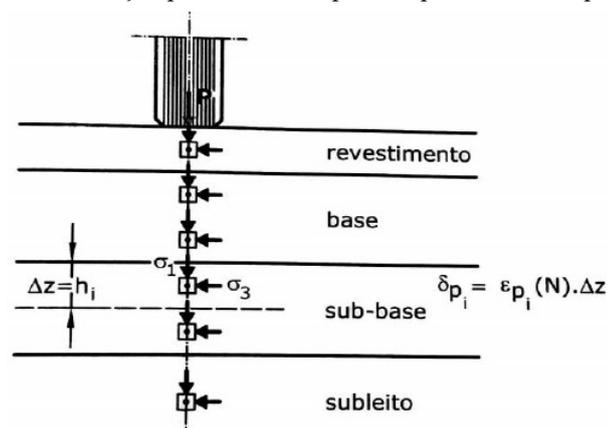
Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

As deformações permanentes aumentam com a quantidade de aplicações de carga e dependem do estado de tensões. Em 1962, no relatório da pista experimental da AASHO foram definidas as seguintes parcelas contribuintes de cada camada.

- a) Revestimento asfáltico: 32%
- b) Base de brita: 4%;
- c) Sub-base: 45%
- d) Subleito: 9%

Para o cálculo da deformação total sob uma carga  $P$ , representado na Figura 6, o somatório das deformações plásticas ou permanentes de cada camada ou subcamada.

Figura 6- Deformação permanente ou plástica por camada de pavimento.



Fonte: Medina e Motta (2015)

Em Medina e Motta (2015), é sugerido o cálculo da deformação permanente por meio da “Equação 2”, lembrando que é necessário conhecer as relações de tensão-deformação plástica de todos os materiais do pavimento e do subleito.

$$\delta_{p\text{total}} = \sum_{i=1}^n (\epsilon_p(i) \times h_i) \quad (2)$$

Onde:  $\epsilon_p$  e  $h_i$  são, respectivamente a deformação plástica média da camada e a espessura da camada de ordem  $i$ , ou da subcamada de ordem  $i$  quando as camadas forem subdivididas para efeito de cálculo. O somatório faz-se para as  $n$  camadas ou subcamadas.

A deformação cisalhante octaédrica, “Equações 3 e 4”, é a principal responsável pelos afundamentos.

$$\gamma_r = \left[ \frac{(2\sqrt{2})}{3} \right] \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_3) \quad (3)$$

$$\gamma_{oct} = \frac{2}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2} \quad (4)$$

onde  $\epsilon_1, \epsilon_2$  e  $\epsilon_3$  são tensões cisalhantes. Com  $\epsilon_2 = \epsilon_3$ , na condição de axissimetria (simetria em relação ao eixo).

Se os materiais do pavimento estiverem com má compactação, a deformação específica volumétrica, “Equação 5”, pode ter influência.

$$v_r = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (5)$$

Em condições de axissimetriado ensaio de compressão triaxial, é, conforme na “Equação 6”:

$$v_r = \epsilon_1 + 2\epsilon_2 \quad (6)$$

### 2.2.3. Fadiga

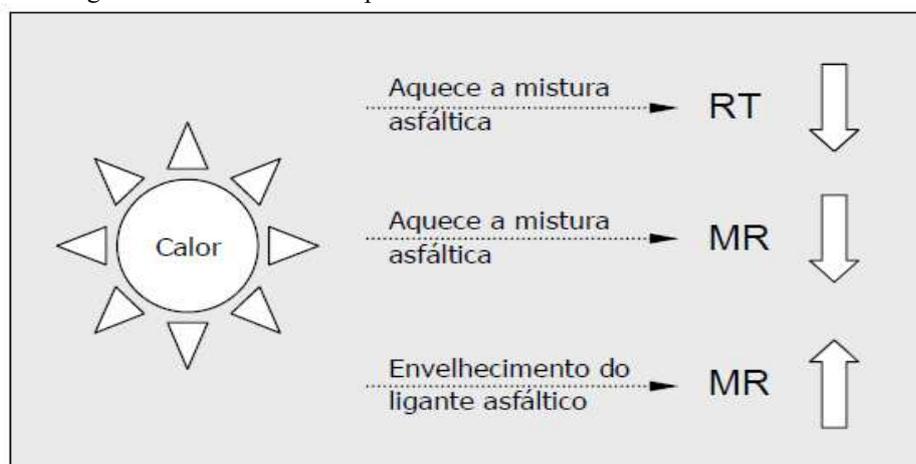
Segundo Franco (2007), no pavimento asfáltico pode surgir por danos relacionado à fadiga no revestimento, ao somatório de deformação permanente nas suas camadas ou por ruptura do subleito. O tráfego qualificado pela quantidade de passagens do eixo padrão no pavimento, refletido pela deformação permanente no topo do subleito ou pelo conceito de serventia e número  $N$  do pavimento, pode não ser significativo quando se quer avaliar uma pavimento quanto à fadiga.

A fadiga das misturas asfálticas é conceituado um fator importante para o dimensionamento adequado do pavimento, o comportamento das camadas dever ser bem caracterizado e os materiais bem analisados. A fadiga pode ocorrer também em materiais quimicamente estabilizados como as britas graduadas com cimento e as misturas solo-cimento.

Bastos (2013) relata que o costume em utilizar o método empírico no dimensionamento de pavimentos, e, até então, o método normatizado, fez com que ele seja utilizado atualmente. Mas o prejuízo é grande, pois se sofre com a deterioração prematura do pavimento atribuído à fadiga dos materiais componentes na pavimentação brasileira.

O aumento de temperatura influencia diretamente no pavimento de várias formas. Uma delas é a redução do Módulo de Resiliência que por consequência aumenta as deformações de tração gerada na base da camada, outra maneira é a redução da resistência à tração, além do envelhecimento acelerado do ligante asfáltico que endurece a mistura asfáltica. (Figura 7)

Figura 7 - Influência da temperatura nas características da mistura asfáltica



Fonte: Franco (2007).

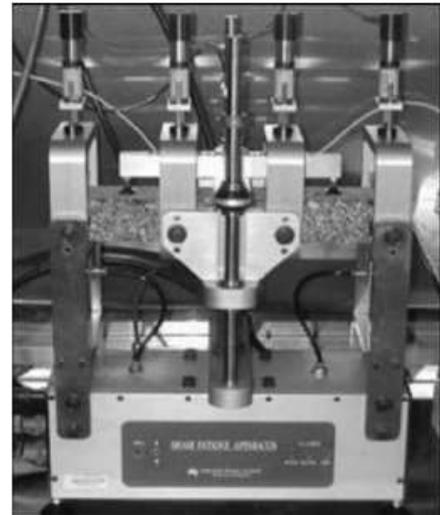
Fadiga é a repetição de cargas das rodas dos veículos aplicada, causando flexão na camada de concreto asfáltico com revestimento betuminoso. As trincas começam, geralmente, pela parte inferior do revestimento, que se propaga para cima até atingir a superfície. (MEDINA; MOTTA, 2015).

Pinto (2016) descreve a caracterização dos materiais quanto à fadiga, que solicitados até a ruptura pela repetição de cargas por flexão ou compressão diametral. No Brasil, o ensaio mais realizado é o de compressão diametral pois é mais fácil de executar. Na Figura 8 se apresenta tipos de ensaios de fadiga em mistura asfáltica.

Figura 8 - Ensaio de fadiga em misturas asfálticas



(a) fadiga à compressão  
Fonte: Pinto (2016).



(b) fadiga à flexão

### 2.3. Defeitos do pavimento

Conforme o uso do pavimento, as propriedades dos materiais por ele composto sofrem alterações em razão do tráfego suportado e pelas intempéries. Normalmente, a situação e intensidade dos defeitos aumentam ao decorrer do tempo de vida e uso do pavimento.

Quando as manutenções são realizadas no início dos defeitos tanto é mais rápido a realização do serviço, quanto é mais econômico por se tratar de ações mais superficiais. Dessa forma permanece as premissas do pavimento de atender o conforto no rolamento e segurança ao usuário. Testes no pavimento são realizados para verificar a intensidade do defeito e avaliar a melhor intervenção para cada caso.

A seguir, tem-se uma sequência dos principais defeitos e suas causas principais, abordando as situações características de cada defeito, desconsiderando o tráfego em relação ao desgaste. Assim, a classificação do defeito sobre a consequência estrutural (suporte de carga), funcionalidade (segurança e qualidade de rolamento) do pavimento e sequenciado na Figura 9.

Figura 9 - Principais defeitos no pavimento flexível  
(continua)

<p style="text-align: center;">Fissura</p> 	<p><b>Definição:</b> Fendas Capilares aparentes no revestimento a uma distância menor que 1,5 metro, em posições transversal, longitudinal ou oblíquo, e seu alongamento deve ser menor que 30 centímetros.</p> <p><b>Principais Causas:</b> -Compactação excessiva ou em momento indevido; -Má dosagem do asfalto, excesso de materiais finos (filler ou material de enchimento) no revestimento.</p> <p><b>Classe:</b> São fendas primárias e ainda não problemáticas à situação estrutural e funcional.</p> <p><b>Correção:</b> Selagem das fissuras com material asfáltico.</p>
<p style="text-align: center;">Trinca transversal</p> 	<p><b>Definição:</b> Trinca isolada em direção perpendicular ao eixo da via. É chamada de trinca transversal curta quando sua extensão é até 100cm, e trinca transversal longa quando maior que 100cm.</p> <p><b>Principais Causas:</b> -Disseminação de trincas em camadas inferiores à do revestimento na via; -Retração da capa asfáltica devido ao endurecimento do asfalto ou a baixas temperaturas.</p> <p><b>Classe:</b> Defeito estrutural (debilita o revestimento do pavimento) e funcional (enormes trincamentos causam irregularidade).</p> <p><b>Correção:</b> Selagem das fissuras com material asfáltico.</p>

(continuação)

<p style="text-align: center;">Trinca longitudinal</p> 	<p><b>Definição:</b> Trinca isolada em direção paralela ao eixo da via. É chamada de trinca longitudinal curta quando sua extensão é até 100cm, e trinca longitudinal longa quando maior que 100cm.</p> <p><b>Principais Causas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Recalque diferencial;</li> <li>-Má execução da junta longitudinal;</li> <li>-Disseminação de trincas em camadas inferiores à do revestimento na via;</li> <li>-Retração da capa asfáltica devido ao endurecimento do asfalto ou a baixas temperaturas;</li> </ul> <p><b>Classe:</b> Defeito estrutural (debilita o revestimento do pavimento) e funcional (enormes trincamentos causam irregularidade).</p> <p><b>Correção:</b> Selagem das fissuras com material asfáltico.</p>
<p style="text-align: center;">Trinca Tipo “Couro de Jacaré”</p> 	<p><b>Definição:</b> Conjunto de trincas associadas sem direções definidas, assemelhando-se à aparência de couro de jacaré.</p> <p><b>Principais Causas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Baixa capacidade de suporte do solo;</li> <li>-Asfalto quebradiço ou duro;</li> <li>-Subdimensionamento ou má qualidade da estrutura ou de uma das camadas do pavimento;</li> <li>-Envelhecimento do pavimento (fim da vida);</li> <li>-Ruína do revestimento asfáltico causado pela fadiga à repetição do tráfego.</li> </ul> <p><b>Classe:</b> Defeito estrutural.</p> <p><b>Correção:</b> Reparação ou Substituição das camadas danificadas.</p>
<p style="text-align: center;">Trinca Tipo “Bloco”</p> 	<p><b>Definição:</b> Conjunto de trincas associadas formando blocos retangulares com lados bem definidos.</p> <p><b>Principais Causas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Baixa resistência à tração da mistura asfáltica;</li> <li>-Retração da capa asfáltica devido à alternância entre baixas e altas temperaturas.</li> </ul> <p><b>Classe:</b> Defeito estrutural (debilita a integridade estrutural do pavimento) e funcional (enormes trincamentos em bloco causam irregularidade).</p> <p><b>Correção:</b> Reparação ou Substituição do revestimento.</p>

(continuação)

<p>Afundamento Plástico nas trilhas de roda</p> 	<p><b>Definição:</b> Deformação perene (plástica) apresentada por depressão da superfície do pavimento adicionado de levantamento (compensação volumétrica lateral). É nomeado afundamento plástico local quando o defeito é dimensionado até 6 metros. E denominado de afundamento plástico de trilha de roda se este for maior que 6 metros e tiver ao longo da trilha de roda.</p> <p><b>Principais Causas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Equivoco na seleção do tipo de revestimento asfáltico para a carga solicitante;</li> <li>-Fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito;</li> <li>-Erro na dosagem de mistura asfáltica – excesso de ligante asfáltico.</li> </ul> <p><b>Classe:</b> Defeito funcional.</p> <p><b>Correção:</b> Reparação ou Substituição das camadas danificadas.</p>
<p>Afundamento de Consolidação nas trilhas de roda</p> 	<p><b>Definição:</b> Deformação perene apresentada por depressão da superfície do pavimento sem a presença de levantamento (compensação volumétrica lateral). É nomeado afundamento de consolidação local quando o defeito é dimensionado até 6 metros. E denominado de afundamento de consolidação de trilha de roda se este for maior que 6 metros e tiver ao longo da trilha de roda.</p> <p><b>Principais Causas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Densificação ou ruptura por cisalhamento de camadas inferiores ao revestimento;</li> <li>-Fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito;</li> <li>-Falha na drenagem;</li> <li>-Problemas de compactação na construção.</li> </ul> <p><b>Classe:</b> Defeito funcional.</p> <p><b>Correção:</b> Reparação ou Substituição das camadas danificadas.</p>
<p>Ondulação ou Corrugação</p> 	<p><b>Definição:</b> Deformação plástica do revestimento, configurado por ondulações ou corrugações transversais na superfície do pavimento.</p> <p><b>Principais Causas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Excessiva umidade do subleito;</li> <li>-Falta de aeração das misturas líquidas de asfalto;</li> <li>-Falha na estabilidade da mistura asfáltica;</li> <li>-Contaminação da mistura asfáltica.</li> </ul> <p><b>Classe:</b> Defeito funcional.</p> <p><b>Correção:</b> Substituição do revestimento.</p>

(continuação)

<p style="text-align: center;">Escorregamento</p> 	<p><b>Definição:</b> Locomoção do revestimento em relação à camada inferior do pavimento com surgimento de fendas em meia-lua.</p> <p><b>Principais Causas:</b> -Falhas construtivas e de pintura de ligação.</p> <p><b>Classe:</b> Defeito funcional.</p> <p><b>Correção:</b> Reparo ou reconstrução do segmento danificado.</p>
<p style="text-align: center;">Exsudação</p> 	<p><b>Definição:</b> Película com brilho vítreo formada na superfície do pavimento composta de material betuminoso, ocasionado pela imigração do ligante por meio do revestimento.</p> <p><b>Principais Causas:</b> -Baixa quantidade de vazios; -Excessiva parcela de ligante.</p> <p><b>Classe:</b> Defeito funcional.</p> <p><b>Correção:</b> Espalhamento manual de agregado fino sobre a superfície exsudada.</p>
<p style="text-align: center;">Desgaste</p> 	<p><b>Definição:</b> Efeito de remoção gradativa do agregado do pavimento, ocasionando aspereza superficial do revestimento.</p> <p><b>Principais Causas:</b> -Falha no teor de ligante; -Presença de água confinada e sobreposição em vazios da camada de revestimento, gerando movimentação de ligante; -Deficiência na adesividade ligante-agregado; -Falhas executivas ou de projeto de misturas.</p> <p><b>Classe:</b> Defeito funcional.</p> <p><b>Correção:</b> Incorporação de camadas ou tratamento para rejuvenescer o pavimento.</p>
	<p><b>Definição:</b> Cavidade, depressões de tamanhos variados no revestimento do pavimento.</p>

(conclusão)

<p style="text-align: center;">Panela ou Buraco</p> 	<p><b>Principais Causas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Falha na compactação;</li> <li>-Trincas de fadiga;</li> <li>-Desintegração localizada na superfície do pavimento;</li> <li>-Deficiência na imprimação;</li> <li>-Umidade excessiva nas camadas de solo.</li> </ul> <p><b>Classe:</b> Defeito funcional.</p> <p><b>Correção:</b> Remendo superficial ou tapa-buraco.</p>
<p style="text-align: center;">Remendo</p> 	<p><b>Definição:</b> Panela preenchida com uma ou mais camadas de revestimento. É considerada operação de conservação, porém ao deixar a região fragilizada e impactar no conforto do rolamento é caracterizada também como defeito. A deterioração de remendos é o compilado de danos existentes em uma área de remendo.</p> <p><b>Principais Causas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Ação do meio ambiente;</li> <li>-Carga de tráfego;</li> <li>-Má execução;</li> <li>-Aplicação de material de má qualidade.</li> </ul> <p><b>Classe:</b> Defeito estrutural e funcional.</p> <p><b>Correção:</b> Se remendo superficial não funcionar, deve ser feito remendo profundo.</p>

Fonte: Adaptado pela autora de CNT (2017)

## 2.4. Métodos de avaliação estrutural em pavimentos asfálticos

Para o método avaliativo estrutural de um pavimento é necessário conhecer o módulo de resiliência, e este pode ser obtido de duas maneiras: método destrutivo ou não destrutivo. Avaliar os materiais, e a partir dos dados realizar ensaios pertinentes a cada caso é essencial para a tomada de decisões.

### 2.4.1. Avaliação estrutural destrutiva

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), o método destrutivo é invasivo, aquele que examina a condição estrutural por camada do pavimento ao realizar perfurações por poços de sondagem ou abertura de trincheiras, possibilitando retirar material de cada camada até o subleito e realizar *in situ* ensaios de capacidade de carga. Por ser destrutivo, deve-se escolher poucos pontos propícios ditos como representativos de cada seguimento a ser avaliado.

A extração realizada do material pode indicar o tipo de solo nas camadas, a espessura e realizar ensaios de laboratório com a amostra e verificar massa específica, umidade, grau de compactação, entre outros, e comparar com situações reais e ideais. A Figura 10 exemplifica uma Avaliação Destrutiva.

Figura 10 - Exemplo de extração de corpos-de-prova e de poços



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

#### 2.4.2. Avaliação estrutural não destrutiva

É recomendada a aplicação do método de avaliação não destrutivo em casos quando existe a necessidade de observar a variação da capacidade de carga ao longo do tempo por meio de medidas de deflexão. Bernucci *et al.* (2010) ainda sugerem para vias de grandes extensões de pista e probabilidade de inúmeras repetições no mesmo ponto.

O pavimento sofre um deslocamento total a cada passagem de roda, e este consiste em duas componentes:

✓ **Deformação elástica:** consequente na flexão alternada do revestimento, denominada por convenção de deflexão, e esta análise é a principal forma de avaliação estrutural de um pavimento em serviço.

✓ **Deformação permanente:** consequente no afundamento de trilha de roda, cuja avaliação é criteriosa na definição de vida útil estrutural e funcional de um pavimento, pois ultrapassado o valor permitido no conceito, já instabiliza as condições de conforto e segurança do tráfego, conforme Bernucci *et al.* (2010).

Denomina-se bacia de deflexão ou delineamento da linha de influência a análise medida do deslocamento elástico do alinhamento de vários pontos a partir da carga sobre um pavimento. (DNER-ME 061/94).

Na Figura 11, tem-se um exemplo de deformação elástica de repetição e trincamento do tipo couro de jacaré. Um exemplo de deformação permanente, Figura 12, por repetição do tipo trilha de roda, podendo ocorrer no revestimento ao subleito.

Figura 11 - Trinca interligada do tipo couro de jacaré



Fonte: DNIT (2003)

Figura 12 - Afundamento de trilha de roda



Fonte: DNIT (2003)

#### 2.4.3. Retroanálise

A facilidade operacional na obtenção da bacia de deflexão pelo método mecanístico empírico na retroanálise foi uma grande conquista para aplicação desse método no reforço de pavimentos.

Bernucci *et al.*, (2010) mencionam a diversidade de análises propostas pelos equipamentos, podendo ser utilizados para levantamentos da condição de pavimentos para sistema de gerência de nível de rede, para análises de rotina ou para projeto de reabilitação. Atentar que os valores numéricos de avaliação estrutural de cada equipamento apresentam grande diferença entre eles. Todos os equipamentos devem ser regularmente calibrados por processos específicos e seguir a aplicação apropriada para o tipo de carregamento.

Segundo Souza Júnior (2018), a utilização de métodos iterativos na análise do pavimento proporciona um estudo detalhado do que o trecho sofreu até ali no momento, pois realiza um banco de dados com as informações de campo com características elásticas, geométricas e estruturais, analisando as deformações e fazendo o estudo das bacias deflectométricas, comparando com os resultados da simulação computacional com o do campo e no *software* admitindo uma porcentagem mínima como margem de erro, admitindo o erro relativo de cada sensor do equipamento de medição, pelo somatório dos valores absolutos calculados entre os sensores, ou pela raiz quadrada.

Considerando as desvantagens de métodos iterativos de retroanálise, pode-se atentar a obtenção de várias soluções para uma mesma bacia em análise devido às diversas configurações estruturais. A solução para minimizar o programa deve permitir a inserção de um módulo inicial ou faixa de aceitação de módulo de resiliência para cada camada, deixando assim o pavimento mais perto da situação em campo, afirma Souza Júnior (2018).

No Brasil, os – deflectômetros - equipamentos de medição de deflexão do pavimento mais utilizados são de duas décadas bem diferentes:

- ✓ A viga Benkelman foi primeiro, na década de 1950. E introduzida no Brasil em 1962. (Carneiro, 1965);
- ✓ O FWD veio depois, na década de 1980. E introduzido no Brasil em 1994. (DNER,1998)

#### 2.4.3.1. Viga Benkelman (VB)

A viga Benkelman é um equipamento simples. Necessita de um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla com eixo carregado com 8,2 t, para a aplicação de carga sob a qual será medida a deformação elástica.

O ensaio se resume a colocar a ponta de prova da VB entre o eixo dos pneus da roda geminada do caminhão. Em seguida, realizar a leitura inicial ( $L_i$ ) do extensômetro e prosseguir com o caminhão se distanciando 10m da ponta de prova, e realizar a leitura final ( $L_f$ ). Essa

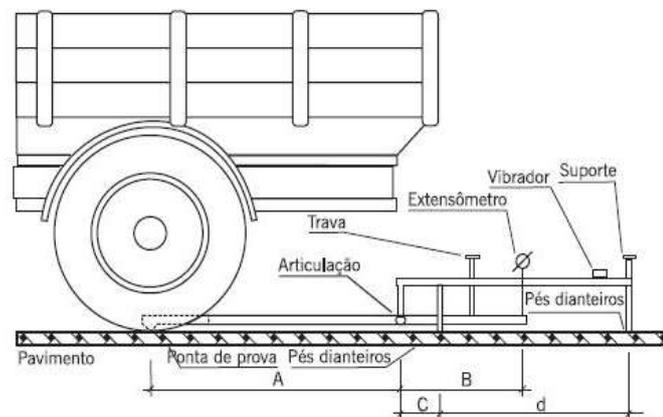
leitura final ( $L_f$ ) correspondente ao descarregamento do pavimento. E todo o deslocamento resultante da deformação elástica do pavimento.

A deflexão ( $d_0$ ) é dada pela fórmula abaixo, na “Equação 7”, sendo  $K$  a constante da viga fornecida pela relação braço maior e o braço menor, articulados:

$$d_0 = (L_i - L_f) \cdot K \quad (7)$$

As Figuras 13 a 15, a seguir, apresentam esquema de utilização e medidas da viga Benkelman. Na Figura 13 mostra a disposição dos elementos ao utilizar a VB. A Figura 14 é aplicação dela em campo. E na Figura 15 é um gráfico das bacias de deflexões.

Figura 13 - Esquema da viga Benkelman



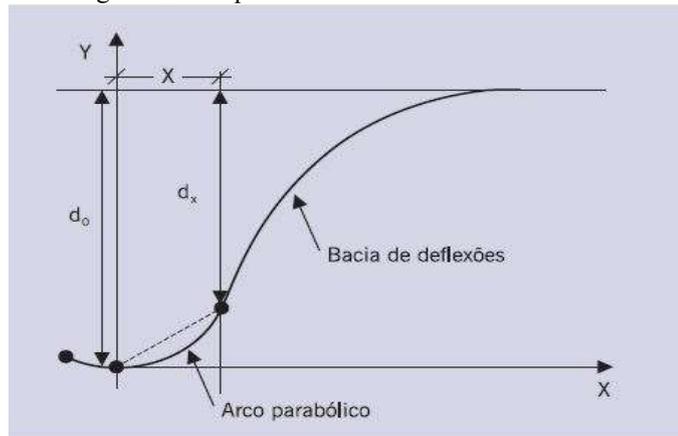
Fonte: DNER (1994)

Figura 14 - Medição em campo com viga Benkelman



Fonte: Empresa fiscalizadora (2012)

Figura 15 - Esquema de medida e raio de curvatura



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

#### 2.4.3.2. Equipamento por impacto *falling weight deflectometer* (FWD)

Para medição dos deslocamentos elásticos, os equipamentos mais atuais, segundo Bernucci *et al.*, (2010), são os de impacto por queda de um peso suspenso a certa altura, sobre amortecedores que avisam o impacto a uma placa metálica apoiada sobre o pavimento no ponto de leitura da deflexão máxima.

As normas regentes para a utilização desse equipamento são DNER-PRO 273 e ASTM D 4695. O FWD é totalmente automatizado, sendo rebocado por um veículo utilitário leve que carrega parte do sistema de sensores que alimenta os dados feito pelo computador, sendo este o deflectômetro. Atenta-se que acima verificou uma diferença entre VB e FWD. E outra diferença é a forma de aplicação da carga, VB é quase estática e FWD é dinâmica. No Quadro 1 pode ser observado as vantagens e desvantagens quanto ao uso da VB e do FWD.

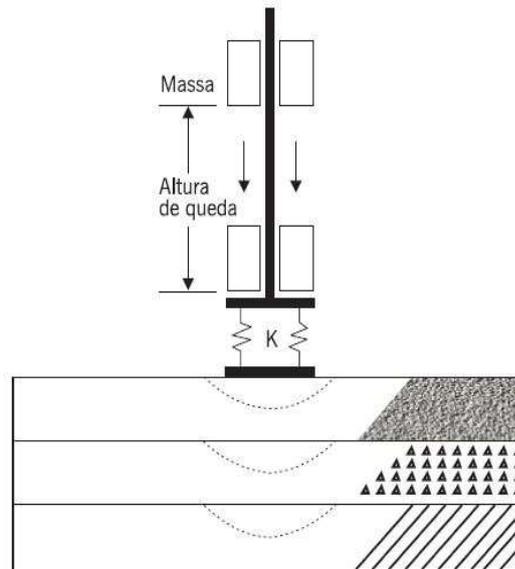
Quadro 1 - Vantagens e Desvantagens no uso da VB e do FWD

FWD em relação à VB convencional	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Maior produtividade (mais pontos levantados por dia);</li> <li>- Registro automático de temperatura e de distâncias dos pontos de ensaio;</li> <li>- Possibilidade de aplicação de vários níveis de carga;</li> <li>- Ensaio não influenciado pelo operador;</li> <li>- Acurácia nas medições;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Necessidade de calibrações mais sofisticadas;</li> <li>- Diferentes resultados entre marcas;</li> <li>- Custo do equipamento;</li> </ul>

Fonte: Adaptado pela Autora (2021)

As Figuras 16 a 18 apresentam esquema de utilização *FWD*. Na Figura 16 o sistema do equipamento *FWD* e as Figuras 17 e 18 são aplicações direta no pavimento.

Figura 16 - Esquema de defletômetro de impacto



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

Figura 17 - Vista geral do FWD Dynatest



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

Figura 18 - Esquema de defletômetro de impacto



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

## 2.5. Método de dimensionamento empírico

Bezerra Neto (2004) alega o empirismo na concentração de experimentos correlacionados ao funcionamento dos pavimentos e propriedade dos materiais empregados na composição. Comparações entre parâmetros estruturais, de vida útil de pavimento em serviço, de tráfego conduziram a concepção de tabelas, ábacos e fórmulas para o dimensionamento desses pavimentos.

No Brasil, o DNIT delega o método DNER para dimensionamento de pavimentos, que resultante do estudo de pistas experimentais da AASHTO, com redução dos fatores de equivalência, aumentando a segurança no dimensionamento, excedendo a segurança, demasiando material por muitas vezes.

No método DNER, de 1966, aborda-se os seguintes itens:

- Espessura mínima do pavimento.
- Análise de tráfego;
- Capacidade de suporte do subleito;
- Coeficiente estrutural;
- Classificação dos materiais granulares empregados no pavimento;

Além do exposto acima, tem-se outros itens a serem analisados, como determinação de suporte do subleito com ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ao analisar a umidade e o tráfego em estudo para analisar a repetição de carga do eixo padrão (8,2 tf), isto é o “Número N” transformando em fatores de equivalência próprio, e relatando as solicitações de carregamento, de acordo com MORAIS, (2014).

Conforme Ferreira (2018), faz-se pertinente, no Brasil, atentar para alguns fatores no cálculo de um pavimento. Estruturalmente, é necessário utilizar dois parâmetros para o dimensionamento pelas diretrizes do DNER e o Módulo de Resiliência (MR) utilizado na Mecânica dos pavimentos. Temos ainda a análise da capacidade resistente do subleito e materiais constituintes através do ensaio de Índice de Suporte Califórnia – CBR, e o grau de compactação dessas camadas não devem ser inferiores a 100% do valor especificado para cada camada.

## **2.6. Método de dimensionamento mecanístico empírico**

Segundo Motta (1991), a verificação mecanística empírica é mais minuciosa por utilizar-se de ferramentas computacionais de modelo elástico linear e não linear, verifica-se as tensões e deformações em comparações com os limites permitidos para a categoria da avaliação mecanística empírica já pré-fixados. Caso os critérios não obedeçam aos valores adotados, e espessura da camada e/ou material das camadas devem ser alterados e reprocessados para refazer a análise. E nesse modo de cálculo-resposta pode ir variando os elementos de estudo para melhor adequação do projeto para evitar deformações permanentes e trincamento por fadiga. Segue os critérios que podem ser analisados a cada processamento: diferença de tensões no revestimento, deflexão máxima admissível na superfície, tensão e deformação de tração na fibra inferior do revestimento, tensão vertical admissível no topo do subleito.

No Brasil, ainda com o grande avanço nas pesquisas no método mecanístico para dimensionamento de pavimentos, entre discussões e comprovações, em sua maioria é realizado somente o método do DNER, embasado nos ensaios de CBR, empiricamente. A não adesão em massa ao mecanístico dos que realizam a pavimentação em nosso país se deve pela complexa mudança de utilização dos métodos, se tornando mais técnico, minucioso em relação ao já acostumado no mercado. Vale lembrar que os estudos em específico nas universidades trabalham de forma independente, não recebem patrocínios para que a pesquisa seja encorpada, reconhecida e difundida para além da comunidade acadêmica. O que limita a sua divulgação para aplicação no meio operacional de pavimentação. (FRANCO, 2007).

Em Morais (2014), segue as vantagens ao utilizar o método mecanístico empírico nos pavimentos flexíveis em conferência com a AASTHO:

- ✓ Possibilidade de prever defeitos específicos;
- ✓ Maior compatibilização entre custo e benefício das obras;
- ✓ Melhor confiabilidade no projeto;

- ✓ Possibilidade de extrapolação de resultados de laboratório e de campo;
- ✓ Melhor utilização dos materiais disponíveis;
- ✓ Possibilidade de se considerar explicitamente os defeitos sazonais.
- ✓ Possibilidade de prever as consequências de novas configurações de carregamento;

Conforme Pinto (2016), o material classificado como elástico linear por toda camada tem o módulo de resiliência (MR) constante, e os materiais não linear ao longo da espessura do pavimento, horizontalmente e conforme o estado de tensões do material naquela seção varia o MR. Em solos granulares, o MR pode ser aferido como realização de ensaio triaxial por meio de carga repetida. E para misturas asfálticas tem-se o ensaio de compressão diametral de carga repetida. O cálculo é devido à relação entre tensão desvio aplicada repetidamente e a deformação resiliente.

No envolvimento da metodologia mecanicista, ela gira em torno da elasticidade das camadas do pavimento. Junta a medição, analisa as deformações plásticas e elásticas dos materiais constituintes. A obtenção do MR de cada camada pode ser através de ensaios ou de programas de retroanálise de bacias de deflexões. (PINTO, 2016).

### *2.6.1. Softwares utilizados para o dimensionamento mecanístico empírico*

#### 2.6.1.1. MeDiNa

Em síntese, o software MeDiNa é um melhoramento técnico do dimensionamento de pavimentos a partir do método do DNER, até então o método normatizado no Brasil. Sendo assim atualizado, envolvido em tecnologias, entre as vantagens do MeDiNa pode-se destacar o fornecimento de dados ao programa com as condições climáticas, mensurar o tempo do surgimento de trincas, entre outros.

Em 2018, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, comemoraram a determinação de um novo programa de dimensionamento mecanístico-empírico, nomeado de MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional). Esse *software* detém três aplicações: um de mesmo nome do método que é para dimensionamento, outro para cálculo de tensões-deformações (AEMC), e o outro para retroanálise (BackMeDiNa). (FRANCO, 2019).

Franco e Motta (2020) reforçam que o MeDiNa é um programa de computador que realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, por meio da rotina AEMC de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas. Valendo lembrar que, para dimensionamento de um pavimento, necessita de conjunto de informações confiáveis, através de dados de laboratórios coletados e analisados corretamente. O programa é bastante sensível em seus resultados quanto à modificação do número  $N$ , ou seja, essa informação torna-se chave para um dimensionamento adequado.

No funcionamento do *software*, a rede de hipóteses fundamentais, válido para as 3 extensões de *softwares* MeDiNa, AEMC e BackMeDiNa, está embasado nos seguintes itens a seguir (FRANCO; MOTTA, 2020):

- a) Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por iterações elásticas lineares);
  - b) A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
  - c) As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
  - d) Todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
  - e) A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
  - f) Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
  - g) A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
  - h) A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
  - i) As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.
  - j) Os materiais para o ensaio são especificados pela norma.
  - k) Material granular: esferas sólidas em vidro com mínimo de 90% de massa passante na peneira nº60 (0,250 mm) e retido na peneira nº80 (0,180 mm); areia natural com mínimo de 90% passante na peneira nº50 (0,300 mm) e retida na nº100 (0,150mm);
- A seguir, no Quadro 2, observa-se as unidades adotadas pelo programa MeDiNa:

Quadro 2 - Unidades de grandezas físicas adotada para MeDiNa, AEMC e BackMeDiNa:

Grandeza	Unidade
Espessura e Distâncias	cm
Raio de carregamento	cm
Deslocamentos	$\mu\text{m}$
Deflexões (VB ou FWD)	0,01 mm
Deformações específicas	m/m
Área de contato	$\text{cm}^2$
Pressão de inflação e tensões	MPa
Carga de eixo ou de roda	ton
Massa específica aparente seca	$\text{g/cm}^3$
Erro quadrático médio (RMS)	%

Fonte: Autora (2021)

#### 2.6.6.2. AEMC

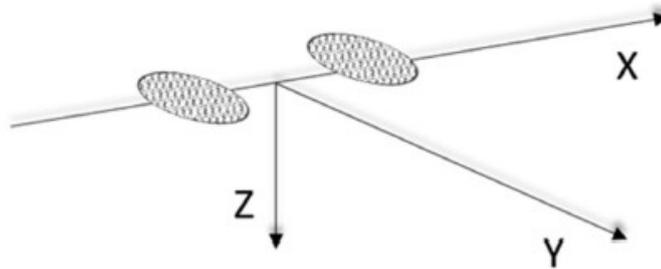
O AEMC é um *software* que analisa a elasticidade das múltiplas camadas, calculando tensões e deformações atuantes sob a carregamento de rodas de eixo rodoviário na estrutura de pavimentos com até oito camadas. É um programa oriundo do MeDiNa, obedecendo as hipóteses fundamentais feita por ele.

De acordo com Franco e Motta (2020), o programa realiza o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, com uma modelagem física parecida com a teoria de molas com o propósito de permitir o movimento horizontal relativo na interface de duas camadas para garantir aderência. O carregamento é simulado pela carga de roda que ela age de forma distribuída uniforme em uma área de contato circular entre o pneu e a superfície do pavimento. E a pressão de contato entre o pavimento e o pneu é validada igual a inflação dos pneus e assim assumido para os cálculos no Brasil.

As hipóteses fundamentais para solução do *software* são as mesmas mencionadas no item 2.6.1.1. Franco e Motta (2020) explana, que possui a vantagem de combinar carregamentos em mais de uma roda, que pela análise elástica linear usa o princípio da superposição. O conjunto básico de cálculo-resposta oferece dados de tensões verticais, tensões radiais, tensões tangenciais, tensões de cisalhamento no plano vertical-radial e deflexões radiais e verticais.

A convenção de eixos no AEMC, como na Figura 19, acontece da seguinte forma:

Figura 19 - Convenção de Eixos X,Y e Z



Fonte: Franco e Motta (2020)

A partir dessa convenção, para valores negativos, sinalizam que está em tração, quando positivos sinalizam que em compressão.

Para a obtenção do Módulo de Resiliência (MR), considerando que os materiais podem ser avaliados como elásticos lineares ou não lineares, apresenta-se uma definição matemática para o MR, em MPa, observe a “Equação 8”

$$MR = K1 \times \sigma_3^{K2} \times \sigma_d^{K3} \times \theta^{K4} \quad (8)$$

Sendo k1, k2, k3 e k4 constantes adquirida em laboratório;

- $\theta$  é a tensão octaédrica (somatório das tensões principais  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ );
- $\sigma_d$  é a tensão desvio;
- $\sigma_3$  é a tensão de confinamento.

Para as condições de aderência, o *software* simula uma modelagem física de teoria de molas, assim permitindo o deslocamento horizontal relativo na interface das duas camadas. Aqui se atenta em quando colocar os dados das espessuras das camadas, não se pode colocar exatamente o valor. Se a análise for a camada de cima, subtrair um microvalor **pra** cima, e caso a análise seja na camada de baixo, adicionar um microvalor para que livre essa interseção. A mola atua na direção radial da interface das duas camadas, como na “Equação 9”.

$$\tau_i = K_i \times (U_i - U_{i+1}) \quad (9)$$

Onde:

- $\tau_i$  é a tensão de cisalhamento radial entre as camadas  $i + (i+1)$ ;
- $U_i - U_{i+1}$  é o deslocamento radial relativo ao longo da interface das camadas  $i + (i+1)$ ;
- $K_i$  é o módulo de rigidez da “mola” que resiste ao deslocamento radial relativo ao longo da interface.

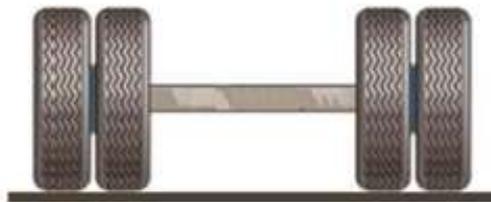
E para  $K_i$  o AEMC faz uma transformação para facilitar o cálculo numérico, com parâmetro adimensional, conforme a “Equação 10”:

$$K_i = \frac{l_i}{1-l_i} \quad (10)$$

Quando se dá valor  $l_i=0$ ,  $\tau_i=0$ , não havendo cisalhamento entre as camadas, estando assim não aderidas. E se caso coloque  $\tau_i=1$  haverá aderência entre as camadas.

Carregamento no AEMC, é de importância averiguar qual o eixo a se utilizar, mas o mais usual é o do eixo padrão duplo (Figura 20), o mesmo utilizado para o cálculo do número  $N$  pelo método do DNIT. Contudo, as informações padrão para cada tipo de eixo se encontra já dentro do *software*.

Figura 20 - Eixo padrão rodoviário de 8,2tf.



Fonte: Franco e Motta (2020)

#### **Dados do Eixo Padrão**

Carga de Eixo: 8,2 tf

Pressão de Pneus: 0,56 MPa

Raio de área de contato: 10,79 cm

Distância entre rodas: 32,4 cm

#### 2.6.6.3. BackMeDiNa

Existem vários *softwares* de retroanálise que podem no auxiliar nesse trabalho, em especial o BackMeDiNa, que é brasileiro e compõe o conjunto de *softwares* do MeDiNa, uma evolução do SisPav, desenvolvido pelo engenheiro Franco, em 2007. Considera-se a sua utilização para explorar mais o MeDiNa e utilizar *softwares* que se integram, alinhados no dimensionamento mecânico empírico e assim diminuir erros diante as considerações adotadas por protocolos internos.

Segundo Franco e Motta (2020), o *software* BackMeDiNa executa a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas de um pavimento a partir das bacias deflectométricas pontuadas em campo por equipamento FWD. Ele funciona de forma iterativa e o módulo de resiliência é encontrado utilizando o módulo AEMC (análise de tensões e deformações do grupo

MeDiNa) para a análise elástica linear em decorrência da variação em torno de um valor central e até que se encontre a bacia teórica mais próxima da levantada em campo pelo FWD. Nesse estudo, o programa faz comparações com a raiz do valor quadrático médio das diferenças das medidas de campo e *software*. As hipóteses de solução computacional do AEMC e BeckMeDiNa são semelhantes, análise de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas, obtendo resultados de tensão, deformação e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura sem precisar dividir em elementos finitos.

O conjunto básico de respostas estruturais que é calculada, a partir das equações elásticas, englobam: tensões verticais; tensões radiais; tensões tangenciais; tensões de cisalhamento no plano vertical-radial; e deflexões verticais e radiais. (FRANCO E MOTTA, 2020).

### 3. METODOLOGIA

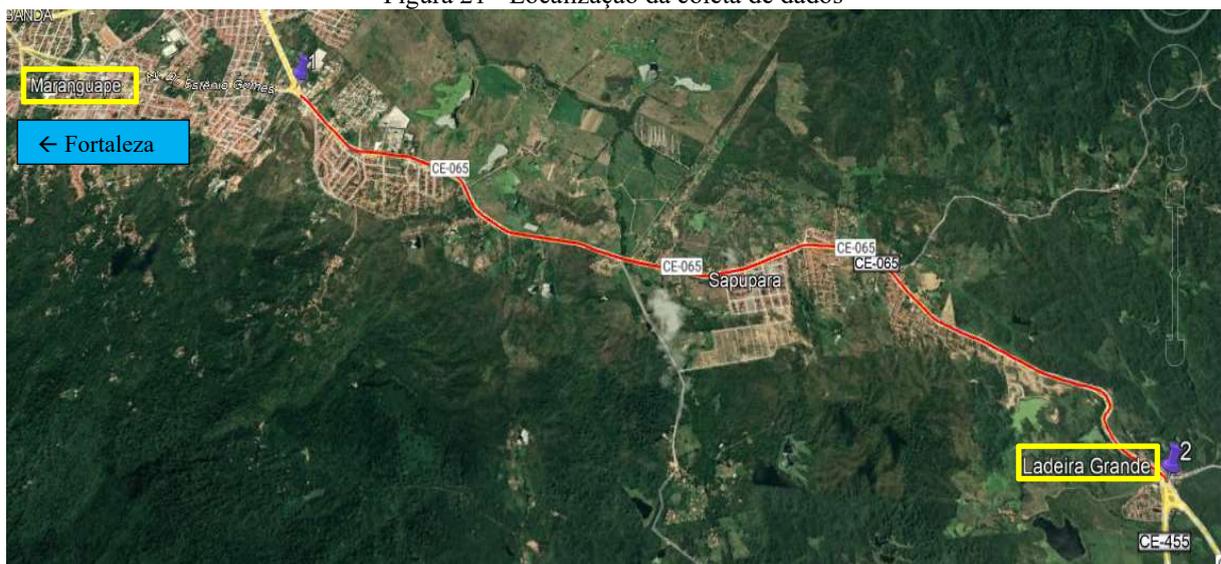
Neste capítulo, será explanado sobre o método utilizado para a pesquisa, etapa de coleta de dados fornecidos pela empresa fiscalizadora responsável pela execução de ensaios e relatórios do trecho em 2012, alimentação do *software* AEMC, geração e análise dos processamentos, e comparação com a bibliografia.

O presente trabalho composto pela coletânea dos conhecimentos gerados pelo referencial teórico, por meio do AEMC será feita uma avaliação de tensão e deformação com base em uma avaliação estrutural destrutiva do pavimento em estudo, localizado no trecho rodoviário da CE-065, que fora projetado pelo método empírico do DNIT. Disposto desse material, transpor os dados para método mecanístico empírico com o *software* MeDiNa na extensão AEMC, após o processamento dos pavimentos em posse dos valores de máxima tração na deformação, aplicar em modelo de fadiga do revestimento para resultar no número N pelo método mecanístico empírico e comparar com o número N de projeto.

#### 3.1. Materiais

O trecho estudado está situado no estado do Ceará, na rodovia CE-065, acesso para os municípios Maranguape a Ladeira Grande, na Figura 21 é destacado o trecho por um trajeto em vermelho. Possui uma extensão de pavimento flexível de 8,4 km, com duas pistas de rolamento e uma faixa de tráfego em cada lado.

Figura 21 - Localização da coleta de dados



Fonte: Google Earth (2021)

A escolha desse trecho de rodovia é pela importância para os acessos aos municípios de Palmácia, Baturité, Canindé. E diante do material de análise disponível referente aos defeitos precocemente apresentados na vida útil do pavimento, optou por fazer uma análise mecanicista para implementar a análise realizada pelo método empírico inicialmente.

Com o aparecimento precoce de defeitos no pavimento, como mostra a Figura 22 e 23, que fora dimensionado no método empírico DNIT, foram solicitados estudos e relatórios do pavimento pós-entrega do trecho para investigação, que inicialmente a suspeita seria fadiga por elevado tráfego na via.

Figura 22 - Trinca de couro de jacaré com o pavimento fadigado em pouco tempo de uso



Fonte: Empresa fiscalizadora (2012)

Figura 23 - Pavimento trincado severamente



Fonte: Empresa fiscalizadora (2012)

Já na Figura 24, pelo método de análise destrutiva, pode-se conferir pouca brita na base em parte do trecho. Possíveis causas contribuintes para aparecimento de defeitos. Na Figura 25 se vê a análise das camadas do pavimento pelo método destrutivo. Dispondo do relatório de análise dos métodos de avaliação do pavimento, recolheu-se dados para simular o pavimento no método mecanístico empírico, através do *software* AEMC.

Figura 24 - Base com pouca brita



Fonte: Empresa fiscalizadora (2012)

Figura 25 - Método de análise destrutiva nas camadas do pavimento.



Fonte: Empresa fiscalizadora (2012)

Na Figura 26 observa-se situação recente do pavimento no trecho em estudo, apresentando defeitos em seu revestimento.

Figura 26 - Situação recente do trecho em estudo



Fonte: Google Earth (2021)

### 3.1.1. Dados do tráfego

Para análise do tráfego, foi utilizado o Número  $N=3,22 \times 10^6$ , que fora o Número N anual de 2019, que seria o horizonte de projeto para uma possível manutenção caso esse número fosse atingido para que seja realizada intervenção no pavimento.

As espessuras médias das camadas mais atuais em campo, verificado em 2012, na avaliação destrutiva, está disposta desta maneira:

- 5,5 cm para revestimento;
- 18 cm para base;
- 19 cm para sub-base.

### 3.1.2. Software utilizado - AEMC

Com o compilado de dados, segue-se para alimentação do software, processamento de dados e análise de resultados. Na Figuras 27 exibe-se interface da tela de trabalho do software AEMC, já explanado no referencial teórico.

Figura 27 - Interface AEMC

The screenshot shows the AEMC v.2.4.2 software interface. At the top, there is a menu bar with 'Projeto' and 'Ajuda'. Below it is a 'Estrutura >>' button. The main area contains a table with the following data:

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	5,5	2,4	LINEAR	4000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0,0
2	18,0	1,8	LINEAR	300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0
3	19,0	1,6	LINEAR	150	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0
4	0,0	1,6	LINEAR	50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,45	0,0

Below the table, there are sections for 'Tipo de carregamento:' and 'Pontos de análise e resultados'. The 'Tipo de carregamento:' section shows options for 'Eixo padrão rodoviário', 'Eixo simples', 'Dois eixos simples (direcional)', 'Eixo duplo', and 'Dois eixos duplos'. The 'Pontos de análise e resultados' section has a 'Calcular' button and a 'Ferramentas >>' button. Below these is a table with the following data:

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)
1	0	0	0			
2	16,2	0	0			
3	0	0	5,49			
4	16,2	0	5,49			
5	0	0	23,49			
6	16,2	0	23,49			
7	0	0	42,51			
8	16,5	0	42,51			
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						

Fonte: Autora (2021)

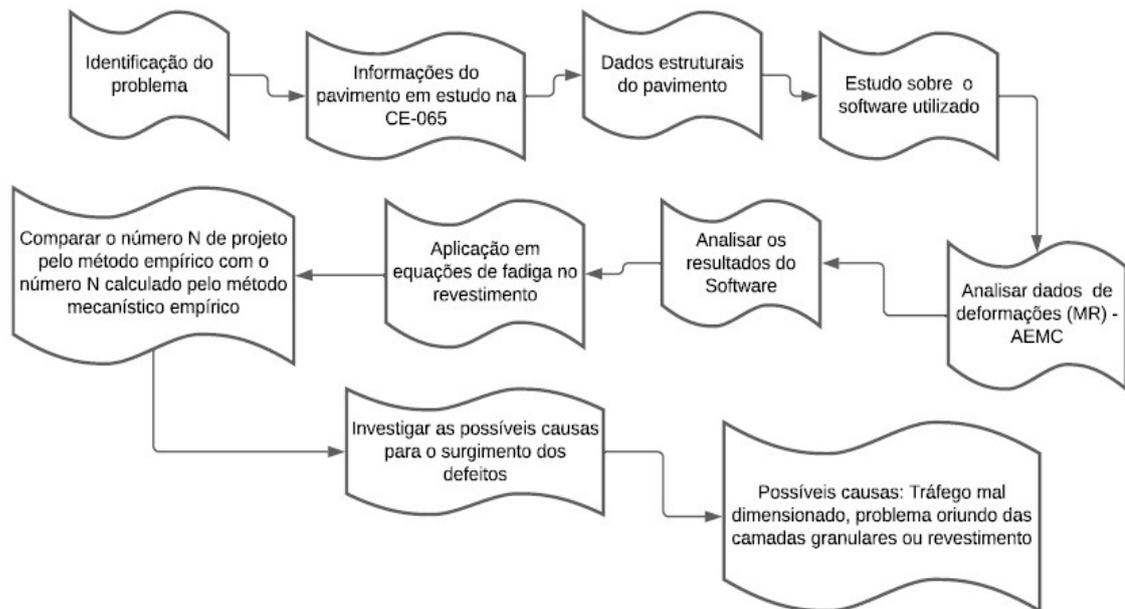
## 3.2 Método e análise de dados

Na aquisição dos dados já coletados pela empresa fiscalizadora, foi possível a identificação dos problemas estruturais e funcionais no pavimento, assim como qualidade das

camadas, bacias de deformações com a utilização da Viga Benkelman e rastreamento das deflexões recuperáveis. E no revestimento foi realizada avaliação objetiva através do IGG.

A partir dessa primeira análise, fez-se transferência de dados necessários do trecho para o preenchimento do *software* MeDiNa na extensão AEMC (Análise de Camadas de Múltiplas Camadas), para análise do pavimento em relação à tensão-deformação pelo método mecanístico empírico e então possível a análise comparativa dos resultados, com a aplicação dos valores de deformação em equações de fadiga no revestimento e assim comparar o número N de projeto com o número N que foi dimensionado pelo método mecanístico empírico. Em seguida, realizar investigação das possíveis causas para o surgimento dos defeitos, se foram problemas oriundos de mal dimensionamento do tráfego, ou problemas nas camadas granulares ou no revestimento. Abaixo, explanando as etapas do trabalho em forma de fluxograma na Figura 28.

Figura 28 - Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Autora (2021)

## 4. RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado os resultados e análises em consequência da execução da metodologia, que a partir deste é possível concluir o desfecho de algumas hipóteses para o aparecimento precoce dos defeitos no pavimento.

Foi possível através do relatório gerado pela empresa fiscalizadora, que por meio de ensaio destrutivo padronizou as espessuras das camadas do pavimento por médias averiguadas no trecho. Vale destacar que os valores adotados pela fiscalizadora são até maiores que as espessuras de projeto do pavimento.

### 4.1. Utilizando o AEMC

No AEMC (Análise de Camadas de Múltiplas Camadas) ao que contribui em maior relevância é a análise de deformação ( $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$ ) na camada de revestimento, para colher o dado de maior tração (valor negativo), que estão localizados nos pontos (3) e (4) examinando toda a profundidade da camada; e posteriormente aplicar nas equações de fadiga do revestimento e verificar.

Na Figura 29, está disposta a caracterização dos componentes do AEMC no processamento de um pavimento. Em verde, o que é *default* do *software*, em vermelho os dados que são alterados de acordo com o projeto em estudo e em magenta são botões respostas de ações.

Figura 29 - Descrição dos componentes do AEMC

AEMC v.2.4.2 (jun/2020)

Projeto Ajuda

Estrutura >> Inserir ou excluir camadas do pavimento

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm <sup>3</sup> )	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	5,5	2,4	LINEAR	4000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0,0
2	18,0	1,8	LINEAR	300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0
3	19,0	1,6	LINEAR	150	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0
4	0,0	1,6	LINEAR	50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,45	0,0

Espressuras conforme "in loco" → "default" → OK → Varia de acordo com os casos pesquisados → "default" → Varia conforme o material

Adesão: Sem aderência

Tipo de carregamento: Eixo padrão rodoviário

Eixo utilizado nos cálculos de dimensionamento do pavimento: EIXO DUPLO

- Número de rodas: 4
- Análise: Semi-eixo
- Carga de eixo (ton): 8,20
- Carga de roda (ton): 2,05
- Pressão de pneus (MPa): 0,56
- Ty (cm): 0,00
- Tx (cm): 32,40
- Lx (cm): 181,00
- Área (cm<sup>2</sup>): 366,07
- Raio (cm): 10,79

Clonar para calcular

Descrição dos símbolos na tabela

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Sz (MPa)	Sxy (MPa)
1	0	0	0	0,00000	0,00000	1092,01098	0,190426	1,597768	0,000000	0,000000
2	16,2	0	0	-21,79976	0,00000	1079,63144	2,169634	2,541179	0,560000	0,000000
3	0	0	5,49	0,00000	0,00000	1091,28926	-0,057419	-1,682067	0,148572	0,000000
4	16,2	0	5,49	23,61686	0,00000	1074,18329	-2,013715	-2,418502	0,325997	0,000000
5	0	0	23,49	0,00000	0,00000	1022,49246	-0,202996	-0,308672	0,114096	0,000000
6	16,2	0	23,49	77,43849	0,00000	966,01343	-0,229068	-0,299709	0,118585	0,000000
7	0	0	42,51	0,00000	0,00000	919,67751	0,075609	0,076622	0,080176	0,000000
8	16,5	0	42,51	-15,75791	0,00000	863,28542	0,067873	0,069109	0,072145	0,000000

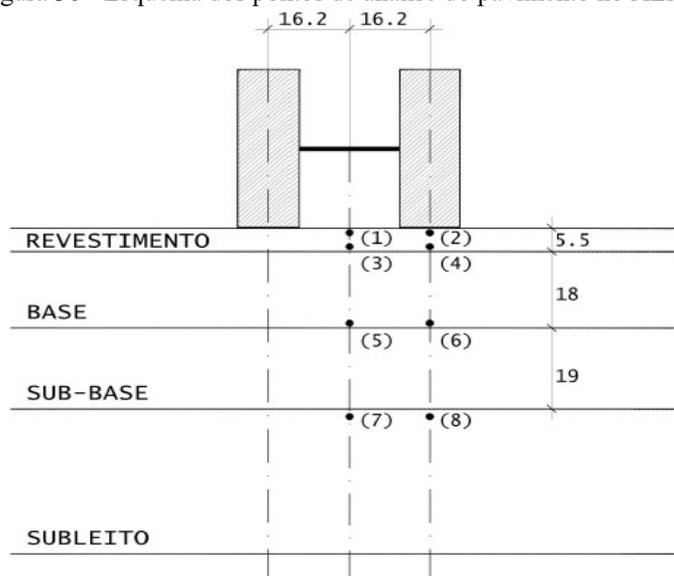
Inserir os pontos de interesse para a análise

Valores calculados após o processamento.

Fonte: Autora (2021)

A seguir, na Figura 30 é disposto um esquema com pontos de análise do pavimento utilizados no AEMC com as devidas distâncias a partir da espessura de cada camada.

Figura 30 - Esquema dos pontos de análise do pavimento no AEMC



Fonte: Autora (2021)

No Quadro 3, são caracterizados os símbolos, unidade de medida e descrição de cada variável apresentada no *software* AEMC.

Quadro 3 - Quadro de variáveis utilizadas no AEMC

Símbolo	Unid.	Descrição
X, Y	cm	Distâncias no plano horizontal
Z	cm	Profundidade
Ux, Uy, Uz	$\mu m$	Deslocamentos nos eixos x, y e z respectivamente
Sx, Sy, Sz	MPa	Tensões no plano X, Y e Z respectivamente
Sxy, Sxz, Syz	MPa	Tensões de cisalhamento nos planos XY, XZ e YZ respectivamente
s1, s2, s3	MPa	Tensões principais
sOctNor, sOctCis	MPa	Tensões octaédricas normal e de cisalhamento
ex, ey, ez	(m/m)	Deformações específicas no plano X, Y e Z respectivamente
exy, exz, eyz	(m/m)	Deformações específicas de cisalhamento nos planos XY, XZ e YZ respectivamente
e1, e2, e3	(m/m)	Deformações específicas principais
Tx	cm	Distância entre rodas
Ty	cm	Distância entre eixos
Lx	cm	Bitola do eixo

Fonte: Autora (2021)

No AEMC, entra-se com os valores dos módulos de resiliência, espessuras das camadas e valores de X, Y e Z, que são referentes aos oito pontos sinalizados para o caso do pavimento em estudo. Sobre distâncias horizontais (X), os pontos pares ficam na distância de 16,2 cm por ser eixo e um pneu. Os pontos ímpares são no eixo e por isso 0 cm. O Y é 0 cm. E a altura (Z) é referente ao ponto de interesse da camada.

- Nos pontos (1) e (2) se quer avaliar deslocamento no topo do revestimento, sendo  $Z = 0$  cm.
- Pontos (3) e (4) se avaliam as tensões e deformações no revestimento, sendo  $Z = 5,49$  cm (um pouco menor que a espessura total da camada).
- Nos pontos (5) e (6) são avaliadas tensões e deformações na base, adota-se  $Z = 23,49$  cm (um pouco menos que o somatório das camadas acima).
- E os pontos (7) e (8) avaliam tensões e deformações verticais na sub-base ou topo do subleito, neste caso já se adota o somatório total das espessuras mais um acréscimo.

Não obtendo os valores de Módulo de Resiliência (MR) do trecho em estudo por meio do relatório, foi necessária seleção bibliográfica de pavimentos que se aproximam com o estudo de caso e desta maneira foram processados os pavimentos A, B, C e D.

No processamento com AEMC, neste estudo, o que mais interessa são os valores de deformações, a máxima tração que o *software* reconhece no valor negativo, ocorrida na

camada do revestimento. Com isso, a análise se enfoca nos pontos (3) e (4) na captura de  $E_x$  ou  $E_y$ , o maior valor negativo entre eles.

### Pavimento A

No pavimento A, é formado a partir do método DER/SP (2006) aplicado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo com influência do método DNIT e algumas variações. Os valores para MR e coeficiente de *Poisson* são definidos a partir de intervalos de valores usuais existentes na tabela do documento IP-DE-P00/001. Verificar os Quadros 4 e 5.

Quadro 4 - Valores Usuais de Módulo de Resiliência

Material	Intervalos de Valores de Módulo de Resiliência (MPa)
Concretos Asfálticos:	
- revestimento (CAP 50-70)	2000 – 5000
- revestimento (CAP 30-45)	2500 – 4500
- binder (CAP 50-70)	2000 – 3000
- binder (CAP 30-45)	2000 – 4000
Materiais granulares:	
- brita graduada	150 – 300
- macadame hidráulico	250 – 450
Materiais estabilizados quimicamente:	
- solo-cimento	5000 – 10000
- brita graduada tratada com cimento	7000 – 18000
- concreto compactado com rolo	7000 – 22000
Concreto de cimento <i>Portland</i>	30000 – 35000
Solos finos em base e sub-base	150 – 300
Solos finos em subleito e reforço do subleito	
- solos de comportamento laterítico LA, LA', LG'	100 – 200
- solos de comportamento não laterítico	25 – 75
Solos finos melhorados com cimento para reforço do subleito	200 – 400
Concreto de cimento Portland	28000 - 45000

Fonte: Adaptado de DER/SP (2006)

Quadro 5 - Valores Usuais de Coeficiente de Poisson

Material	Intervalo de Valores de <i>Poisson</i>	Valor Recomendado de Coeficiente de <i>Poisson</i>
Concreto de Cimento Portland	0,10 – 0,20	0,15
Materiais estabilizados com cimento	0,15 – 0,30	0,20
Misturas asfálticas	0,15 – 0,45	0,30
Materiais Granulares	0,30 – 0,40	0,35
Solos do Subleito	0,30 – 0,50	0,40

Fonte: Adaptado de DER/SP (2006)

A seguir temos um esquema com pontos de análise do pavimento utilizados no AEMC (Figura 31) com as devidas alturas a partir da espessura de cada camada junto aos dados do DER/SP (Quadro 6).

Quadro 6 - Módulos de Resiliência adotados para o AEMC – (Pavimento A)

Camada	MR (Mpa)	Coef. Poisson	Espessura (cm)
Revestimento	4000	0,30	5,5
Base	300	0,40	18
Sub-base	150	0,40	19
Subleito	50	0,45	0

Fonte: Adaptado pela autora (2021)

Figura 31- Processamento do pavimento no AEMC - (Pavimento A)

AEMC v.2.4.2 (jun/2020) Projeto Ajuda

Estrutura >>

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm <sup>3</sup> )	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	5,5	2,4	LINEAR	4000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0,0
2	18,0	1,8	LINEAR	300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0
3	19,0	1,6	LINEAR	150	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0
4	0,0	1,6	LINEAR	50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,45	0,0

Tipo de carregamento:

Eixo padrão rodoviário

Eixo simples

Dois eixos simples (direcional)

EXIXO DUPLO

Número de rodas: 4

Análise: Semi-eixo

Carga de eixo (ton): 8,20

Carga de roda (ton): 2,05

Pressão de pneus (MPa): 0,56

Ty (cm): 0,00

Tx (cm): 32,40

Lx (cm): 181,00

Área (cm<sup>2</sup>): 366,07

Raio (cm): 10,79

Pontos de análise e resultados

Calcular Ferramentas >>

Ponto	Sxy (MPa)	Syz (MPa)	Sxz (MPa)	Ex (m/m)	Ey (m/m)	Ez (m/m)	Exy (m/m)	Eyz (m/m)	Exz (m/m)	s1 (MPa)
1	0,000000	0,000000	0,000000	-7,22260e-05	3,85160e-04	-1,34115e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	1,597768
2	0,000000	0,000000	0,000000	3,09820e-04	4,30572e-04	-2,13311e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	2,541179
3	0,000000	0,000000	0,000000	1,00657e-04	-4,27353e-04	1,67604e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	0,148572
4	0,000000	0,000000	0,000100	-3,46491e-04	-4,78047e-04	4,13916e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	6,51142e-08	0,325997
5	0,000000	0,000000	0,000000	-4,17218e-04	-9,10375e-04	1,06255e-03	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	0,114096
6	0,000000	0,000000	0,000052	-5,22061e-04	-8,51718e-04	1,10032e-03	0,00000e+00	0,00000e+00	4,81076e-07	0,118585
7	0,000000	0,000000	0,000000	1,00989e-04	1,30381e-04	2,33444e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	0,080176
8	0,000000	0,000000	0,000010	8,61590e-05	1,22031e-04	2,10064e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	6,00417e-07	0,072145
9										
10										

Fonte: Autora (2021)

Verificado o maior valor de tração no ponto (4), com  $\epsilon_y: -478 \times 10^{-6} \text{ m/m}$  para deformação na camada do revestimento, conforme assinalado na Figura 31 para Pavimento A.

## Pavimento B

De acordo com Ribeiro (2016), sua pesquisa foi realizada em solos cearenses com foco na Região Metropolitana de Fortaleza e adjacências. Assim, analisamos o pavimento B de acordo com o Quadro 7 e na Figura 32 retrata o processamento do pavimento.

Quadro 7 - Módulos de Resiliência adotados para o AEMC – (Pavimento B)

Camada	MR (Mpa)	Coef. Poisson	Espessura (cm)
Revestimento	3000	0,30	5,5
Base	400	0,35	18
Sub-base	400	0,35	19
Subleito	290	0,40	0

Fonte: Adaptado pela autora (2021)

Figura 32 - Processamento do pavimento no AEMC - (Pavimento B)

AEMC v.2.4.2 (jun/2020)  
Projeto Ajuda

Estrutura >>

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	5,5	2,4	LINEAR	3000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0,0
2	18,0	1,8	LINEAR	400	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
3	19,0	1,6	LINEAR	400	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
4	0,0	1,6	LINEAR	290	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0

Tipo de carregamento:

Eixo padrão rodoviário

Eixo simples

Dois eixos simples (direcional)

**EIXO DUPLO**

Número de rodas: 4

Análise: Semi-eixo

Carga de eixo (ton): 8,20

Carga de roda (ton): 2,05

Pressão de pneus (MPa): 0,56

Ty (cm): 0,00

Tx (cm): 32,40

Lx (cm): 181,00

Área (cm²): 366,07

Raio (cm): 10,79

Pontos de análise e resultados

Calcular Ferramentas >>

Ponto	Sxy (MPa)	Syz (MPa)	Sxz (MPa)	Ex (m/m)	Ey (m/m)	Ez (m/m)	Exy (m/m)	Eyz (m/m)	Exz (m/m)
1	0,000000	0,000000	0,000000	-1,87887e-04	2,42945e-04	-2,35964e-05	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
2	0,000000	0,000000	0,000000	2,41715e-04	3,09392e-04	-9,75223e-05	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
3	0,000000	0,000000	0,000000	2,25599e-04	-3,02204e-04	6,93989e-05	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
4	0,000000	0,000000	-0,000035	-2,93845e-04	-3,77067e-04	3,87214e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	-3,02362e-08
5	0,000000	0,000000	0,000000	-1,36979e-04	-5,18202e-04	6,03262e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
6	0,000000	0,000000	0,000022	-2,89495e-04	-4,92788e-04	6,97788e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	1,48122e-07
7	0,000000	0,000000	0,000000	4,74960e-05	7,23871e-05	1,20502e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
8	0,000000	0,000000	0,000019	4,17888e-05	6,62789e-05	1,08664e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	1,79239e-07
9									
10									

Fonte: Autora (2021)

Verificado o valor de maior de tração no ponto (4),  $\epsilon_y: -377 \times 10^{-6}$  m/m para deformação na camada revestimento, conforme assinalado na Figura 32 para Pavimento B.

## Pavimento C

De acordo com Lima (2019), os solos cearenses analisados em sua pesquisa são provenientes da Região Metropolitana de Fortaleza e da Cidade de Morada Nova, localizada na região do Vale do Jaguaribe disposto no Quadro 8. Seguiu-se para a análise do Pavimento C.

Quadro 8 - Módulos de Resiliência adotados para o AEMC – (Pavimento C)

Camada	MR (Mpa)	Coef. Poisson	Espessura (cm)
Revestimento	4193	0,337	5,5
Base	798	0,35	18
Sub-base	130	0,35	19
Subleito	52	0,40	0

Fonte: Adaptado pela autora (2021)

Figura 33 - Processamento do pavimento no AEMC - (Pavimento C)

AEMC v.2.4.2 (jun/2020)  
Projeto Ajudá

Estrutura >>

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	5,5	2,4	LINEAR	4193	0,0	0,0	0,0	0,0	0,337	0,0
2	18,0	1,8	LINEAR	798	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
3	19,0	1,6	LINEAR	130	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
4	0,0	1,6	LINEAR	52	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0

Tipo de carregamento: EIXO DUPLO

Pontos de análise e resultados

Calcular Ferramentas >>

Ponto	Sxy (MPa)	Syz (MPa)	Sxz (MPa)	Ex (m/m)	Ey (m/m)	Ez (m/m)	Exy (m/m)	Eyz (m/m)	Exz (m/m)	s1 (MPa)
1	0,000000	0,000000	0,000000	-4,00759e-05	2,30553e-04	-9,68185e-05	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	1,026577
2	0,000000	0,000000	0,000000	1,96809e-04	2,62765e-04	-1,45799e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	1,841307
3	0,000000	0,000000	0,000000	7,30897e-05	2,79212e-04	1,23827e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	0,121539
4	0,000000	0,000000	0,000091	-2,40874e-04	-3,19497e-04	3,51606e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	0,425876
5	0,000000	0,000000	0,000000	-2,71429e-04	-5,63240e-04	5,11614e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	0,079633
6	0,000000	0,000000	0,000086	-3,42546e-04	-5,32522e-04	5,36255e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	2,82290e-07
7	0,000000	0,000000	0,000000	1,47510e-04	1,82904e-04	3,31765e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	0,061513
8	0,000000	0,000000	0,000007	1,28308e-04	1,72931e-04	3,02477e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	3,82406e-07
9										
10										

Fonte: Autora (2021)

Verificado o valor de maior de tração no ponto (4),  $\epsilon_y: -319 \times 10^{-6}$  m/m para deformação na camada revestimento, conforme assinalado na Figura 33 para o Pavimento C.

### Pavimento D

Conforme Porto (2021), seu estudo foi realizado em um trecho de rodovia entre a cidade de Beberibe-CE até Natal/RN. E os dados dos pavimentos estão no Quadro 9.

Quadro 9 - Módulos de Resiliência adotados para o AEMC – (Pavimento D)

Camada	MR (Mpa)	Coef. Poisson	Espessura (cm)
Revestimento	8289	0,30	5,5
Base	259	0,40	18
Sub-base	433	0,42	19
Subleito	297	0,45	0

Fonte: Adaptado pela autora (2021)

Figura 34 - Processamento do pavimento no AEMC - (Pavimento D)

AEMC v.2.4.2 (jun/2020)  
Projeto Ajudá

Estrutura >>

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	5,5	2,4	LINEAR	8289	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0,0
2	18,0	1,8	LINEAR	259	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
3	19,0	1,6	LINEAR	433	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
4	0,0	1,6	LINEAR	297	0,0	0,0	0,0	0,0	0,45	0,0

Tipo de carregamento: EIXO DUPLO

Pontos de análise e resultados

Calcular Ferramentas >>

Ponto	Sxy (MPa)	Syz (MPa)	Sxz (MPa)	Ex (m/m)	Ey (m/m)	Ez (m/m)	Exy (m/m)	Eyz (m/m)	Exz (m/m)
1	0,000000	0,000000	0,000000	-5,60937e-05	2,21760e-04	-6,67140e-05	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
2	0,000000	0,000000	0,000000	1,69203e-04	2,46687e-04	-1,28052e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
3	0,000000	0,000000	0,000000	7,93122e-05	-2,41488e-04	8,42635e-05	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
4	0,000000	0,000000	0,000043	-1,85883e-04	-2,68274e-04	2,16431e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
5	0,000000	0,000000	0,000000	-2,06979e-04	-4,99142e-04	7,44700e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
6	0,000000	0,000000	0,000017	-2,64803e-04	-4,61691e-04	7,50313e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	1,77615e-07
7	0,000000	0,000000	0,000000	2,40116e-05	3,32267e-05	5,78177e-05	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00
8	0,000000	0,000000	0,000018	1,98881e-05	3,06418e-05	5,10465e-05	0,00000e+00	0,00000e+00	1,72363e-07
9									
10									

Fonte: Autora (2021)

Na Figura 34, verificado o valor de maior de tração no ponto (4),  $\epsilon_y: -268 \times 10^{-6} \text{ m/m}$  para deformação na camada revestimento.

#### 4.2 Aplicando em Equações modelo de fadiga

Após as simulações com dados coletados das deformações no AEMC, foram selecionadas equações de fadiga (Tabela 1) que tivesse a menor quantidade de variáveis desconhecidas possíveis para haver menos interferência nos resultados. Equação A e B são aplicadas nos 4 pavimentos A, B, C e D.

Tabela 1 - Modelos de equações para fadiga no revestimento

<b>Título</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Idealizador</b>	<b>Fonte</b>
Equação A	$N=2,85 \times 10^{-7} \times (\epsilon_y)^{-3,69}$	Pinto e Preussler – CAP 50-70	DER/SP (2006)
Equação B	$N_f=0,0796 \times (\epsilon t)^{-3,291} \times (S)^{-0,854}$	Método Shell – ligante convencional	Arao (2014)

Fonte: Autora (2021)

Onde:

$N=N_f$ = vida de fadiga

$\epsilon t$  = Deformação de tração inicial (in/in);

$\epsilon_y$  = Deformação específica no plano y (m/m);

$S$ = rigidez (Psi)

Na Tabela 2 se dispõe dos valores adquiridos a partir do AEMC e pesquisa bibliográfica

Tabela 2 - Dados de Deformação e MR dos pavimentos

<b>Pavimento</b>	<b><math>\epsilon_y</math> (m/m)</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>MR (ksi)</b>
Pav. A	$-478 \times 10^{-6}$	4000	580,15
Pav. B	$-377 \times 10^{-6}$	3000	435,11
Pav. C	$-319 \times 10^{-6}$	4193	608,14
Pav. D	$-268 \times 10^{-6}$	8289	1202,22

Fonte: Autora (2021)

Com o Número  $N=3,22 \times 10^6$  de projeto do pavimento em serviço, este foi comparado aos testes de modelos da aplicação das equações A e B. Na Equação A de fadiga, valores menores ou iguais ao número N de projeto, atende às condições, estando apto a suportar o tráfego que pode ser solicitado em segurança até  $N=3,22 \times 10^6$ . Por consequência, Pavimento A, B e C não causam fadiga por pavimento mal dimensionado. Observa-se os resultados na Tabela 3.

Ainda na Equação A, o Pavimento D teria problemas pois seu número N é maior que o de projeto,  $N=3,22 \times 10^6$ . Assim também, a simulação da Equação B seria descartada por ser maior que o número N de projeto. Vale salientar que essa equação haveria de ser descartada por utilizar não somente a deformação máxima de tração. A rigidez é uma variável difícil de analisar nas condições em estudo. A Equação A melhor se adequa as análises.

Tabela 3 - Resultado de aplicação de equações de fadiga

Equação de Fadiga	Pav. A	Pav. B	Pav. C	Pav. D
Equação A	$5,10 \times 10^5$	$1,23 \times 10^6$	$2,27 \times 10^6$	$4,32 \times 10^6$
	Atende! OK	Atende! OK	Atende! OK	Não Atende!
Equação B	$2,94 \times 10^7$	$8,22 \times 10^7$	$1,07 \times 10^8$	$1,06 \times 10^8$
	Não Atende!	Não Atende!	Não Atende!	Não Atende!

Fonte: Autora (2021)

## 5. CONCLUSÃO

Neste capítulo, serão expostas as validações realizadas neste trabalho em resumo aos resultados obtidos, junto ao processo realizado no decorrer da pesquisa em paralelo à atenção aos objetivos específicos aqui propostos inicialmente. Foi realizado estudo com pavimentos testes nomeados em Pavimento A, B, C e D.

### 5.1. Análise estrutural do pavimento

Para a análise estrutural foi necessário Módulo de Resiliência e coeficiente de Poisson dos 4 pavimentos. Realizou-se uma pesquisa bibliográfica para eleger pavimentos semelhantes ao caso em estudo, em solos cearenses. Desta forma, teve dados suficientes para o processamento na análise mecanística empírica através do *software* AEMC que pelo método de cálculo-resposta dispõe dados de tensão-deformação e deslocamentos nas camadas.

### 5.2. Fadiga no revestimento asfáltico

Foram selecionadas e aplicadas equações de fadiga do revestimento asfáltico de acordo com a que servia para o caso e dados disponíveis. A partir de dados obtidos pelo AEMC, como a máxima deformação de tração na camada do revestimento para cada pavimento, foi aplicada em duas equações. Pela equação de Pinto e Preussler, (DER/SP, 2006) somente o Pavimento D sofreria fadiga. Já pela equação de Shell, (Arao, 2014) todos os pavimentos sofreriam fadiga. Constatando, nessas condições, que o defeito causado no pavimento não é por fadiga no revestimento. No relatório da empresa fiscalizadora, após algumas hipóteses referentes à retroanálise das bacias deflectométricas, chegaram à conclusão de que os defeitos não foram gerados por fadiga no pavimento devido ao número N encontrado, também, ser maior que o de projeto.

### 5.3. Defeitos que surgiram no pavimento

Os defeitos mais comuns presentes no pavimento em estudo são trincas tipo “couro de jacaré” e fadiga, no geral. Sendo as trincas e panelas mais evidentes em trechos que já tinham passado por restauração. Descartada a hipótese de alto tráfego de veículos ser o causador dos defeitos no pavimento que comumente é um dos principais, em parceria com avaliação destrutiva, foi possível observar potentes causadores de defeitos. Nos corpos de prova, foram analisados alguns pontos, tais como: Teor de asfalto abaixo do especificado em projeto;

Ausência de filler na mistura asfáltica; Base com pouca brita que pode ter influenciado na má compactação da base.

Já na análise não destrutiva, realizada pela Viga Benkelman, descartando as deflexões causadas por fadiga através do tráfego, sugere: Incorreta dosagem do teor de Concreto Asfáltico Poroso (CAP); Seleção imprópria de materiais para revestimento; Variação de materiais durante a usinagem.

Em resumo, confere que a causa dos defeitos tem sido a má qualidade do revestimento, seja na seleção de material, mistura ou aplicação. Junto a esse agravante, a baixo grau de compactação da base foi importante para tornar os defeitos mais incisivos, tomando proporções em grandes extensões da via.

Vê-se a importância do método mecanístico empírico, que cancelou a hipótese primária do defeito de fadiga ser causado pelo subdimensionamento do tráfego, com valores claros e objetivos. Com isso, partiu para outras verificações que constatou a causa em más escolhas e más aplicações dos materiais do revestimento e base.

Em contrapartida, atenta-se a quão sensível é a tecnologia mecanicista à mudança das variáveis, e que se não estiver em condições perfeitas para o preenchimento de dados, por exemplo, inviabiliza todo o processo, pois os valores comunicam entre si quando se fala de um mesmo pavimento. É confiável, sim, quando em condições favoráveis. Caso não, rever as componentes do estudo.

#### **5.4. Proposta para trabalhos futuros**

Para continuar análise neste pavimento, para trabalhos futuros, é válido realizar pesquisa para tornar viável e coerente a transformação de deflexões medidas pela Viga Benkelman em *FWD*, desta maneira seria possível obter o Módulo de Resiliência real do trecho em estudo através do *software* BackMeDiNa. Em seguida aplicar no AEMC e teria a contraprova do número N no pavimento corretamente.

## REFERÊNCIAS

- ARAO, Mieka. **Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas**. 2014. 61f. Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro. 2014.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007
- BASTOS, J. B. S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**. 2013. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013
- BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.
- BEZERRA NETO, R.S. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empíricos do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. 189p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- CNT, **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/>. Brasília – DF, 2017. Acesso em Março de 2021.
- CNT, **Pesquisa CNT de Rodovias 2019**. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/>. Brasília – DF, 2019. Acesso em Março de 2021.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER/SP). **Instrução de Projeto de Pavimentação IP-DE-P00/001**. Instrução de Projeto. São Paulo, SP, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos. Terminologia**. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2003.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. 3, ed. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Pavimento – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman**. (DNER-ME 061/94)
- FILHO, José Moacir de Mendonça; ROCHA, Eider Gomes de Azevedo. Estudo comparativo entre pavimentos flexível e rígido na pavimentação rodoviária. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 03, Ed. 06, Vol. 02, pp. 146-163, Junho de 2018. ISSN:2448-0959. Disponível em:

<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/pavimentos-flexivel#42-Comparativo-economico?pdf=16311?pdf=16311>. Acesso em: 04 jun. 2021.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav**. 2007. 294 p. Tese de Doutorado. (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 2007.

FRANCO, F.A.C.P. *et al.* Análise de projeto de reforço utilizando o método M-E de Dimensionamento Nacional –MeDiNa. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. 2019, Balneário Camboriú. **Anais**, p. 1 – 12. Balneário Camboriú, 2019.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. Manual de utilização**. Versão 1.1.4. Rio de Janeiro, 2020.

GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

LIMA, Thayssa Vieira de. **Estudo comparativo entre o comportamento mecânico de misturas solo-brita com calcário e granito para uso em pavimentação**. 2019. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2019.

MEDINA, Jacques de, MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos**. 3º edição. Rio de Janeiro. 2015. 638 p.

MORAIS, Vanessa Ariadne. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento empírico e empírico-mecânico de pavimentos flexíveis**. 2014. 128 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

MOTTA, L.M.G., **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, 366p. (1991).

PINTO, Rodrigo Lemos. **Comparação entre o Dimensionamento de Reforço de Pavimentos Asfálticos pelo Método Mecânico-Empírico e os Métodos DNER-PRO 11/79 e DNER-PRO 269/94 para um Segmento Homogêneo da BR-222/CE e Análise de Sensibilidade do Programa SisPavBR**. 2016. 125 f. Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro.

PORTO, Arthur Araújo. **Método de dimensionamento dnit x método mecânico-empírico: comparação direta da simulação do desempenho mecânico de um trecho de rodovia**. 2021. 93f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -Centro Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.

RIBEIRO, Antônio Júnior Alves. **Um modelo de previsão do módulo de resiliência dos solos no estado do Ceará para fins de pavimentação**. 2016. 151 f. Tese de doutorado – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.

**SOUZA JÚNIOR, José Geraldo de. Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal.** 2018. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

**SPADA, J.L.G., Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea.** Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.