

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS –
CÂMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS III
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

GABRIEL SANTOS NOVATO

**Retroanálise de Bacias de Deflexão e Dimensionamento Mecanístico Empírico de
Pavimentos Asfálticos: Estudo de Caso**

Goiânia/GO

2021

GABRIEL SANTOS NOVATO

**Retroanálise de Bacias de Deflexão e Dimensionamento Mecanístico Empírico de
Pavimentos Asfálticos: Estudo de Caso**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Áreas Acadêmicas III do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Oliveira - IFG

Coorientadora: Profa. Dra. Lilian Ribeiro de Rezende
- UFG

Goiânia/GO

2021

N936r Novato, Gabriel Santos.

Retroanálise de bacias de deflexão e dimensionamento mecanístico empírico de pavimentos asfáltico: estudo de caso / Gabriel Santos Novato. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.

91f.; il.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Oliveira.

Coorientadora: Profa. Dra. Lilian Ribeiro de Rezende.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631

Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Gabriel Santos Norato

Matrícula: 20181011050019

Título do Trabalho: Retroanálise de Bacias de Depressão e Método Mecanístico Empírico: Estudo de Caso

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 03 / 02 / 22.
Local Data

Gabriel Santos Norato
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

Gabriel Santos Novato

RETROANÁLISE DE BACIAS DE DEFLEXÃO E DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos quesitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Membros da banca: Dr. João Carlos de Oliveira (orientador), Me. Ricardo Alves Cardoso ; Me Marcela Leão Domiciano.

Aprovado em 21 de Dezembro de 2021.

Documento assinado eletronicamente por:

- Joao Carlos de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/01/2022 14:45:15.
- Ricardo Alves Cardoso, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/12/2021 08:42:27.
- Marcela Leao Domiciano, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO, em 21/12/2021 18:28:33.
- Matilde Batista Melo, COORDENADOR - FUC1 - GYN-2CCSBE, em 21/12/2021 18:27:32.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 21/12/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 232134

Código de Autenticação: 235d1bf980



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110

(62) 3227-2736 (ramal: 2736)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Paulo Lincoln Novato e Silvia Yama dos Santos Novato, além de todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para o meu sucesso profissional ao longo de minha formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

São tempos de comemorar. É, há alguns anos, eu encontrei o verdadeiro significado dos estudos e a sua real importância para enaltecer a minha capacidade humana e profissional para a minha vida toda. A trajetória nunca foi fácil até aqui, pois até mesmo, na época de pré-vestibular, as dificuldades sempre estavam presentes, mas, ao longo dela, eu consegui encontrar pessoas que me fizeram sempre ir adiante e que me mostraram que o caminho dos estudos é o certo e o profissionalismo vem ao longo do tempo pelas experiências que adquirimos na vida.

Gostaria de dizer um muito obrigado a minha família por sempre me apoiar em todas as circunstâncias e contribuir, de forma significativa, para a formação da pessoa honesta e digna que eu sou hoje; professores do IFG que tanto me ensinaram para, cada dia mais, eu me tornar um profissional melhor e auxiliar a sociedade ao longo de toda a minha vida. Em especial, o professor João Carlos de Oliveira que sabia do desafio deste trabalho para a comunidade científica do IFG, mas que, sobretudo, acreditou no meu potencial para podermos realizar este trabalho. Também agradecer ao professor Paulo Francinete que nunca deixou de acreditar que era capaz de vencer todas as adversidades do meu caminho e fazer eu ir sempre além e ao professor Giovane Batalione que com a sua humildade e fé na educação pode me mostrar o quão importante vale os estudos para o sucesso tanto profissional quanto pessoal.

Dizer obrigado também aos meus colegas que, durante a faculdade, me mostraram que a união faz a força; aos meus amigos que sempre estiveram comigo para me dar conselhos e apoiar naquilo que eu tinha dificuldade ou medo e também para todas as pessoas passaram pela minha vida e aos meus amigos que sempre me incentivaram a fazer o certo. Também gostaria de agradecer por todas as pessoas que diretamente o indiretamente contribuíram para a minha formação acadêmica profissional.

Muito obrigado a todos que acreditaram que este dia, de fato, chegaria,

Gabriel Santos Novato

EPÍGRAFE

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.” (Isaac Newton)

RESUMO

NOVATO, Gabriel Santos. **Retroanálise de bacias de deflexão e dimensionamento mecânico empírico de pavimentos asfálticos: estudo de caso.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2021.

Os pavimentos asfálticos possuem uma estrutura de camadas finitas que interagem mecanicamente entre si a partir dos diferentes parâmetros de rigidez dos materiais constituintes das camadas. O método mecânico empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos busca correlacionar as tensões das cargas variáveis dos veículos com as deformações existentes no pavimento. Os efeitos da aplicação de cargas cíclicas corroboram para o surgimento de trincas ocasionadas pela fadiga e afundamento de trilhas de roda ao longo de todo o período que o pavimento foi projetado. Para realizar o dimensionamento, realizou-se a compatibilização das espessuras das camadas do pavimento em função dos materiais constituintes. O trabalho teve como objetivo retroanalisar as bacias de deflexão obtidas na pista experimental da Central de Abastecimento de Goiás (CEASA-GO), no município de Goiânia, e o pavimento asfáltico foi construído com sub-base e base de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil e revestimento em concreto asfáltico. As retroanálises foram feitas através do software BackMeDiNa, disponibilizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), utilizando dados de ensaios deflectométricos realizados na pista com o uso da viga Benkelman. Os dados do ensaio de viga Benkelman foram ajustados para o modelo de dados obtidos no ensaio de *Falling Weight Deflectometer* (FWD), indicados para o uso no software BackMeDiNa. Após a realização das retroanálises e ajuste dos módulos de elasticidade das camadas do pavimento, um novo dimensionamento do pavimento asfáltico foi realizado, utilizando o método mecânico-empírico denominado Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), software também disponibilizado pelo DNIT. A análise mecânico-empírica permitiu avaliar a vida útil do pavimento em termos de danos por área trincada e de deformações permanentes. As análises fornecidas pelo novo dimensionamento relacionaram-se com o estado real de conservação da pista experimental e demonstraram coerência quanto ao bom estado de conservação do pavimento.

Palavras-chave: Retroanálise de bacias de deflexão. BackMeDiNA. Retroanálise com Viga Benkelman, FWD. MeDiNa

ABSTRACT

NOVATO, Gabriel Santos. Retroanalysis of deflection basins and empirical mechanistic design of asphalt pavements: case study. 2021. Course Completion Paper – Bachelor's Degree in Civil Engineering – Federal Institute of Education, Science and Technology of Goiás, Goiânia, 2021.

Asphalt pavements have a structure of finite layers that mechanically interact with each other based on the different stiffness parameters of the materials constituting the layers. The empirical mechanistic method of designing asphalt pavements seeks to correlate the tensions of the variable loads of the vehicles with the existing deformations in the pavement. The effects of the application of cyclic loads corroborate the appearance of cracks caused by fatigue and sinking of wheel tracks throughout the period that the pavement was designed. To carry out the design, the thicknesses of the pavement layers were made compatible with the constituent materials. The objective of this work was to retro-analyze the deflection basins obtained in the experimental track of the Central de Abastecimento de Goiás (CEASA-GO), in the municipality of Goiânia, and the asphalt pavement was built with sub-base and base of recycled aggregates of solid waste from civil construction and asphalt concrete coating. The retroanalyses were performed using the BackMeDiNa software, made available by the National Department of Transport Infrastructure (DNIT), using data from deflectometric tests carried out on the runway using the Benkelman beam. Benkelman beam test data were fitted to the data model obtained from the Falling Weight Deflectometer (FWD) test, indicated for use in the BackMeDiNa software. After performing the retroanalyses and adjusting the modulus of elasticity of the pavement layers, a new dimensioning of the asphalt pavement was carried out, using the mechanistic-empirical method called National Pavement Dimensioning Method (MeDiNa), software also made available by DNIT. The mechanistic-empirical analysis made it possible to evaluate the useful life of the pavement in terms of damage by cracked area and permanent deformation. The analyzes provided by the new design were related to the actual state of conservation of the experimental track and demonstrated consistency regarding the good state of conservation of the pavement.

Keywords: Retroanalysis of deflection basins. BackMeDiNA. Retro-analysis with Viga Benkelman, FWD. Medina.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Deformações permanentes em pavimentos asfálticos	22
Figura 2 - Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e as tensões solicitantes	23
Figura 3 - Ilustração da aparelhagem da Viga Benkelman.....	27
Figura 4 - Ilustração da posição de ensaio do aparelho de Viga Benkelman	29
Figura 5 - Ilustração do sistema massa-mola para o ensaio de FWD.....	30
Figura 6 - Ilustração do Esquema de Leituras e Aplicação de Carga do Ensaio de FWD	33
Figura 7 - Trincas de defeitos superficiais em pavimentos flexíveis	37
Figura 8 - Fluxograma para método mecanístico empírico	41
Figura 9 - Fluxograma MPEDG	42
Figura 10 - Interface geral do programa BackMeDiNa.....	44
Figura 11- Ilustração da correlação de distâncias entre o centro de placa circular do carregamento	45
Figura 12 - Modelo de planilha para inserção de dados no software BackMeDiNa	47
Figura 13 - Ilustração geral do programa MeDiNa para alterar estrutura do pavimento	49
Figura 14 - Ilustração do gráfico de MR x Tensão de confinamento para o Sub-leito	55
Figura 15 - Ilustração do gráfico de MR x Tensão de confinamento para o Base	55
Figura 16 - Ilustração do gráfico de MR x Tensão de confinamento para o Sub-base	56
Figura 17 - Ilustração geral da pista do CEASA-GO em imagem de satélite	58
Figura 20 - Planilha padrão para imputar os dados no software	65
Figura 21 - - Interface do BackMeDiNa para a retroanálise da pista experimental da CEASA GO	66
Figura 22 - Valores das deflexões correlacionadas de acordo com Borges (2001).....	68
Figura 23 - Interface do BackMeDiNa para os dados de deflexão por Borges (2001)	69
Figura 24 - - Tela de configuração do MeDiNa para o material de concreto asfáltico da pista experimental	71
Figura 25 - Tela de configuração do MeDiNa para o material de base da pista experimental.	72
Figura 26 - Tela de configuração do MeDiNa para o material de sub-base da pista experimental	73
Figura 27 - Tela de configuração do MeDiNa para o material de subleito da pista experimental	74

Figura 28 - Dados do tráfego para o cálculo do número N	75
Figura 29 - Tela de interface geral do MeDiNa (resiliente não linear)	76
Figura 30 - Tela de resultado geral do MeDiNa (resiliente não linear).....	76
Figura 31 - Evolução dos danos no pavimento para o tempo de 10 anos (resiliente não linear)	77
Figura 32 - Afundamento de trilha de roda para cada camada (resiliente não linear).....	77
Figura 33 - Tela de interface geral do MeDiNa – Modelo Resiliente Linear.....	78
Figura 34 Resultados gerais do MeDiNa - Modelo Resiliente Linear	79
Figura 35 - Visão geral da pista experimental	80
Figura 36 - Trincas e fissuras na pista experimental	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Peso específico dos materiais utilizados na pista experimental	53
Quadro 2 - Resultados resumidos para as camadas da pista experimental do ensaio de ISC	54
Quadro 3 - Parâmetros de resiliência (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) para as camadas da pista experimental	56
Quadro 4 - Contagem de tráfego para a pista experimental CEASA-GO – Agosto de 2005	57
Quadro 5 - Contagem de tráfego para a pista experimental CEASA-GO – Agosto de 2005	57
Quadro 6 - Distâncias convertidas da Viga Benkelman para FWD	63
Quadro 7 - Deflexões em micrômetros sobre o revestimento da pista CEASA-GO método Theisen <i>et al</i> (2009)	63
Quadro 8 - Ilustração dos resultados do BackMeDiNa para as bacias retroanalisadas do método Theisen	66
Quadro 9 - Módulos de Resiliência da retroanálise para Borges (2001)	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
UFG	Universidade Federal de Goiás
IFG	Instituto Federal de Goiás
RSCC	Resíduos Sólidos da Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
ISC	Índice de Suporte Califórnia
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
ME	Mecanístico Empírico
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
CEASA-GO	Centrais de Abastecimentos de Goiás
ESRD	Eixo Simples de Roda Dupla
MR	Módulo de Resiliência
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
LTPP	<i>Long Term Pavement Performance</i>
COPPE	Instituto Alberto Luiz de Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
MEPDG	<i>Mechanist-Empirical Pavement Design Guide</i>
AASHTO	<i>Association of State Highway and Transportation Officials</i>
PROMEDINA	Programa de Monitoramento de Segmentos Experimentais
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S/A
VDM	Volume Diário Médio

LISTA DE SÍMBOLOS

ε_r	Deformação Axial Recuperável
σ_d	Tensão de Desvio ou Tensão Vertical Aplicada Repetidamente
σ_{d3}	Tensão de Confinamento
σ_{d1}	Tensão de Compressão
kgf/cm ²	Quilograma-força por Centímetro ao Quadrado
lb/pol ²	Libra por Polegada ao Quadrado
tf	Tonelada Força
Lo	Comprimento Inicial
Lf	Comprimento Final
mm	Milímetro
m	Metro
cm	Centímetro
mm/min	Milímetro por Minuto
F	Força de Pico
M	Massa de Peso
g	Aceleração da Gravidade
h	Altura de Queda
k	Constante de Mola do Sistema de Arnotecedores
ms	Milissegundo
Km/h	Quilômetro por Hora
.xsl	Formato Padrão de Arquivo no Programa Excel
Xi	Distância Calculada
xi	Distância entre os Pontos da Bacia de Deflexão
d _{cg}	Distância Entre o Centro Geométrico
AT	Área Trincada
N _{trincado}	Número de Células Trincadas
N	Número Total de Células no Segmento Experimental
N'	Número Equivalente Deslocado
Z e n	Parâmetros de Curva Sigmoidal
A e B	Metros

.csv	Formato de Arquivo no Programa Excel que armazena as informações em vírgulas
kgf	Quilograma Força
µm	Micrômetro
MPa	Mega Pascal
FV	Fator do Veículo
FC	Fator de Carga
VMD	Volume Médio Diário
N	Número Equivalente de Repetições do Eixo Padrão de 8,2 tf
K1, k2, k3 e k4	Parâmetros de Resiliência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 Escopo do Trabalho	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 Avaliação Estrutural de Pavimentos Asfálticos.....	22
2.1.1 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	24
2.2 AVALIAÇÃO FUNCIONAL DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	34
2.2.1 PATOLOGIAS FUNCIONAIS MAIS COMUNS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	35
2.3 RETROANÁLISE	38
2.4 NOVO MÉTODO BRASILEIRO PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	40
2.4.1 – BackMeDiNa	43
2.4.2 –MeDiNa	48
2.5 ESTUDO DE CASO: PISTA EXPERIMENTAL DA CENTRAL DE ABASTECIMENTO DE GOIÁS S.A (CEASA-GO).....	52
3 METODOLOGIA.....	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1 DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O MeDiNa	70
4.3 AVALIAÇÃO FUNCIONAL DA PISTA EXPERIMENTAL	80
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	82
REFERÊNCIAS.....	84

APÊNDICE A – RESULTADOS DE VIGA BENKELMAN PARA A PISTA EXPERIMENTAL DE OLIVEIRA (2007) – CONSTRUÇÃO (JAN/2004).....	91
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

A engenharia sempre foi motivada por tendências que melhoram o cotidiano da sociedade para que a relação custo-benefício seja cada vez melhor. Os avanços tecnológicos dos últimos anos trouxeram a necessidade de novos métodos para dimensionamento de pavimentos asfálticos brasileiros, fomentando assim, a execução de pavimentos com mais qualidade e durabilidade.

A dinâmica de novas ideias para melhorar o desempenho e reduzir os custos dos pavimentos brasileiros mostra que o uso de materiais reciclados na estrutura do pavimento é promissora e contribui para a preservação do meio ambiente, quanto ao destino adequado dos resíduos sólidos advindos da industrialização. Por exemplo, o uso de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (RSCC), também denominados de resíduos de construção e demolição (RCD), tem sido objeto de vários estudos no mundo para demonstrar a sua viabilidade de utilização em pavimentos flexíveis. Segundo Leal (2001), a Holanda é o país que mais utilizou agregados reciclados em pavimentos flexíveis, como cerca de 80%, para mitigar a falta de materiais em sua região. Ademais, consoante Zordan (1997), o uso desse material em pavimentos corrobora em menor custo, maior eficácia do resíduo quando adicionado ao solo e aumento substancial da capacidade de suporte.

O dimensionamento dos pavimentos asfálticos brasileiros encontra-se em fase de transição, do método empírico, utilizado no Brasil desde a década de 1960, com base no Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ration* (CBR), para o método mecanístico-empírico, baseado na análise tensão *versus* deformação da estrutura e na obtenção de parâmetros mecânicos dos materiais por meio da aplicação de carregamento dinâmico ou cíclico.

Os métodos mecanístico-empíricos, doravante denominados de ME, são métodos que se valem de conceitos da mecânica para desenvolver modelos teóricos sobre o comportamento estrutural do pavimento. O comportamento dos materiais constituintes é parametrizado por meio de conhecimento empírico, laboratorial ou de pista, e essa é a quantia empírica do método (BALBO, 2007).

Na abordagem ME, a partir de uma estrutura pré-dimensionada é feita uma avaliação na relação tensão-deformação que ocorre na estrutura do pavimento causada pelas cargas impostas pelo tráfego.

As respostas estruturais são determinadas com o auxílio de recursos computacionais. Adicionando as informações dos materiais, são calculados os danos acumulados na vida de serviço da via. Isso proporciona uma comparação do desempenho do pavimento frente aos critérios necessários para o bom uso da rodovia.

Além disso, quando não são atendidos os critérios de desempenho, varia-se os parâmetros do pavimento, como espessuras, propriedades dos materiais (coeficiente de Poisson e módulo de resiliência), até que se satisfaça uma estrutura ideal em termos econômicos, funcionais e de vida útil.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em sua divisão de pesquisas, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), tem trabalhado nas últimas décadas para a efetiva elaboração de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos brasileiros denominado Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos - MeDiNa.

Além disso, em Julho de 2021, o DNIT lançou uma revisão instrução técnica (IS-247), denominada de Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional - MeDiNa, para orientar projetistas que buscam utilizar o método mecanístico empírico para o dimensionamento de pavimentos.

O programa PRO-MeDiNa foi criado pelo DNIT, através do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), a fim de avaliar o comportamento de pavimentos pelo monitoramento de segmentos experimentais e foi dividido em três partes: construção, monitoramento e tratamento de dados.

O método mecanístico-empírico com base no software MeDiNa, principal ferramenta para o novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos do DNIT, encontra-se disponibilizado para a fase de teste público e está sendo implementado em diversos projetos de pavimentação pelo país.

1.1 Objetivos

Neste tópico serão apresentados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar a retroanálise de bacias de deflexão obtidas na pista experimental da CEASA-GO, implantada no final do ano 2003 e, com base nos módulos de resiliência retroanalizados das camadas, redimensionar o pavimento utilizando o método mecanístico-empírico.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos do trabalho, tem-se:

- Realizar a análise e o ajuste de bacias de deflexão obtidas no trecho experimental utilizando o ensaio de Viga Benkelman para bacias equivalentes às obtidas no ensaio de FWD – Falling Weight Deflectometer, que são utilizadas no software BackMeDiNa. Os trabalhos utilizados como referência para o ajuste das bacias foram realizados por Theisen *et al* (2009) e Borges (2001).
- Realizar a retroanálise das bacias de deflexão ajustadas utilizando o software BackMeDiNa, para previsão dos módulos de resiliência das camadas da pista experimental.
- Realizar um novo dimensionamento do pavimento asfáltico utilizando os módulos retroanalizados e o software MeDiNa;
- Realizar uma vistoria na pista experimental da CEASA a fim de verificar o seu atual estado de conservação.
- Realizar uma análise comparativa dos danos obtidos no dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento e o estado atual de conservação da pista objeto de estudo.

1.2 Escopo do Trabalho

No capítulo 01 – Introdução, é apresentada uma contextualização do tema, a motivação para realização do estudo, os objetivos gerais e específicos e o escopo do trabalho.

No capítulo 02 – Referencial Teórico, são abordados diversos tópicos referentes ao tema como a avaliação estrutural e funcional de pavimentos asfálticos, as retroanálises de bacias de deflexão, o novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos em implantação no Brasil e o histórico da pista experimental da CEASA-GO, objeto de estudo.

No capítulo 03 – Metodologia – são apresentados os materiais e métodos a serem utilizados para a realização do trabalho, desde a obtenção e tratamento dos dados, o uso dos softwares BackMeDiNA e MeDiNa e realização de um levantamento *in loco* para verificar o atual estado de conservação do pavimento.

No capítulo 04 – Resultados e Discussões – são apresentados e analisados os resultados dos ajustes das bacias de deflexão da Viga Benkelman para o FWD, das retroanálises das bacias de utilizando o BackMeDiNA , do dimensionamento do pavimento via método mecanístico empírico pelo MeDiNa e da vistoria na pista experimental do CEASA-GO.

No capítulo 05 - Conclusões e Sugestões para Pesquisas Futuras – são apresentadas as conclusões obtidas com a realização do trabalho e sugestões para a realização de pesquisas futuras.

Por fim, estão apresentadas as referências utilizadas para a realização do trabalho e o Apêndice A contendo os resultados das deflexões do ensaio de Viga Benkelman de acordo com Oliveira (2007).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Avaliação Estrutural de Pavimentos Asfálticos

A avaliação estrutural de pavimentos asfálticos, segundo a norma DNER-PRO 010/79 (DNER, 1979), possui o objetivo de apontar as deficiências do pavimento e fornecer elementos para o cálculo da vida restante ou do reforço necessário para um novo número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão, o eixo simples de roda dupla - ESRD, carregado com 8,2 t, durante o período de projeto.

Os pavimentos asfálticos, ao longo da sua vida útil, estão sujeitos à ação de cargas que ocasionarão fadiga em sua estrutura, provocando o surgimento de trincas e fissuras longitudinais e transversais. As inúmeras solicitações de cargas que o pavimento está sujeito correlacionam com a sua capacidade de carga, rigidez dos materiais e dimensionamento.

As denominadas deformações permanentes muitas vezes são ocasionadas pela densificação adicional gerada pelo tráfego. Essa deformação permanente é um dos efeitos mais comuns da pavimentação asfáltica, podendo ser atribuída ao revestimento, subcamadas ou pela combinação dos efeitos de cargas de tráfego (BERNUCCI *et al*, 2010).

A Figura 1 ilustra algumas deformações permanentes comuns as quais os pavimentos asfálticos estão submetidos ao longo de sua vida útil:



Fonte: Bernucci *et al* (2010)

A estrutura de um pavimento asfáltico é constituída por camadas finitas, com espessuras variáveis, sobrepostas por diferentes materiais, como solos e agregados, compactados e cobertos por uma camada de revestimento asfáltico para que tenham mais rigidez e capacidade de suporte a fim de mitigar o efeito da fadiga inerente às cargas dos veículos.

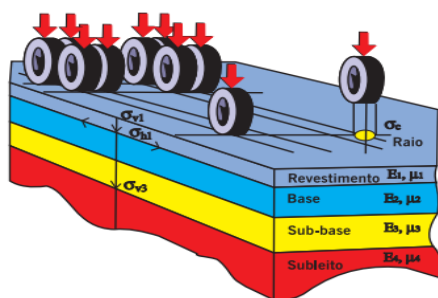
De acordo com o autor Medina (1997), as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural, pois essas camadas contribuem para limitar as deformações e tensões na estrutura do pavimento, por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes.

Os diversos materiais que compõem os pavimentos asfálticos ou flexíveis buscam atenuar os efeitos das tensões do tráfego impostas a ele e, conseqüentemente, as deformações que estão associadas a fadiga do pavimento, como os trincamentos. Para Balbo (2007), todos os materiais constituintes das camadas do pavimento devem sofrer deformações compatíveis com a sua natureza para evitar danos prematuros em suas camadas.

Bernucci *et al* (2010) descrevem que as tensões e deformações induzidas às camadas do pavimento asfáltico proveniente do trânsito de veículos corrobora para os problemas estruturais mais comuns, como trincas e fissuras.

A Figura 2 ilustra um esquema de distribuição de tensões para um sistema de camadas do pavimento flexível e as tensões solicitantes verticais e horizontais através da tração e compressão dos pneus dos veículos.

Figura 2 - Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e as tensões solicitantes



Fonte: Albernaz (1997)

2.1.1 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

As avaliações estruturais dos pavimentos asfálticos podem ser realizadas através de métodos destrutivos e não destrutivos.

2.1.1.1 MÉTODO NÃO-DESTRUTIVO

O método não-destrutivo, para avaliar o pavimento estruturalmente, é baseado nos dados de levantamentos deflectométricos para avaliar a carga do pavimento em função do esforço atuante. Dessa forma, ele busca avaliar os parâmetros de resposta da estrutura em função das cargas de roda atuando dentro do regime elástico no qual o pavimento foi dimensionado.

Conforme Cardoso (1992), o método se baseia na análise do deslocamento vertical que é o parâmetro de resposta cuja medida é mais simples e mais confiável quando comparado com métodos de tensões ou deformações e, assim, contribuem abundantemente para o uso de equipamentos do tipo medidores de deflexões.

O Guia para Execução de Segmentos Experimentais - PRO MeDiNa- se divide em três fases que se referem à construção, o monitoramento do segmento ao longo da sua vida útil e a terceira diz respeito ao tratamento dos dados coletados. Além disso, descreve-se abaixo a exemplificação de cada fase:

- Fase 1 – Construção: estudos preliminares e execução (caracterização dos materiais e controle de execução)
- Fase 2 – Monitoramento: avaliação das condições funcionais e estruturais do pavimento e dos efeitos climáticos
- Fase 3 – Tratamento de Dados

O dado mais comum utilizado na avaliação estrutural de pavimento é a deflexão reversível. Essa deflexão é ocasionada, na maioria das vezes, pela resposta estrutural das

camadas e do subleito do pavimento quando este é submetido a cargas verticais recuperáveis na estrutura do pavimento.

De acordo com Borges (2001), o valor da deflexão reversível diminui com o aumento de profundidade das camadas estruturais pelo distanciamento do ponto de aplicação da carga, porém depende dos valores de módulo de resiliência obtidos em função da rigidez das camadas.

2.1.1.2 MÉTODO DESTRUTIVO

O método destrutivo pode ser definido como o método que possui a metodologia de retirar amostras do pavimento e avaliar em laboratório o módulo resiliente. Ademais, conforme (MARCON, 1996), o método é denominado destrutivo, pois invalida a área do pavimento, que foi retirada as amostras, para testes futuros.

Segundo (BORGES, 2001) a deformação plástica e resiliente das camadas do pavimento e subleito condicionam para a vida de fadiga das camadas superficiais mais próximas da superfície.

Por definição, o módulo resiliente (MR) de solos e materiais granulares pode ser obtido através da Equação 2.1:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \text{ (Equação 2.1)}$$

Onde:

MR = módulo resiliente

σ_d = tensão de desvio repetida ou tensão vertical aplicada repetidamente; e,

ϵ_r = deformação axial recuperável

No laboratório, o ensaio para determinar o módulo resiliente utiliza o equipamento chamado triaxial dinâmico. Esse equipamento, por sua vez, busca relacionar ensaios de compressão por aplicação axial de forças repetidas em amostras cilíndricas de vários diâmetros e alturas distintas.

Neste ensaio, o corpo de prova é submetido a uma tensão de compressão (σ_{d1}) e uma tensão de confinamento (σ_{d3}). A amostra é submetida a sucessivos carregamentos e descarregamentos repetidos, mede-se, portanto, as deformações recuperáveis (ϵ_r). De posse dos valores da deformação recuperável (ϵ_r) e tensão de desvio (σ_{d1}) obtém-se o módulo de resiliência (MR) que traduz a capacidade do solo de retornar a sua situação original após ser submetido a um carregamento repetido.

2.1.2 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Os ensaios comumente utilizados para avaliar estruturalmente o pavimento asfáltico são denominados de Viga Benkelman e *Falling Weight Deflectometer (FWD)* orientados, respectivamente, pelas normas DNER-ME 061/94 e DNER-PRO 273/96.

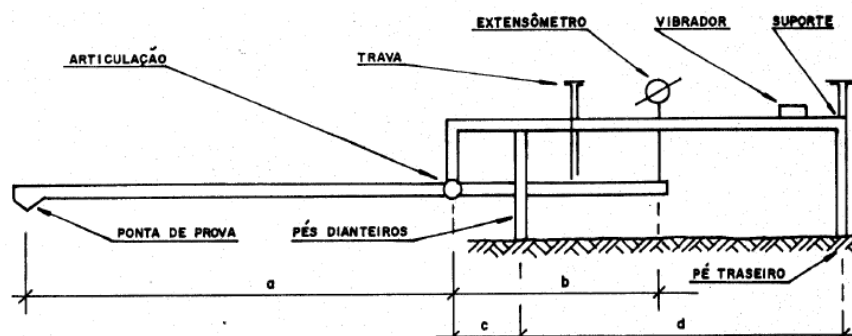
2.1.2.1 VIGA BENKELMAN (VB)

O ensaio de Viga Benkelman, baseado na norma DNER-ME 061/04, é o ensaio mais utilizado, em pavimentos brasileiros, para averiguar as condições do pavimento em função das deflexões elásticas geradas pela ação de cargas em sua superfície.

De acordo com a norma DNER (1994), esse ensaio traz a possibilidade de averiguar a influência da linha longitudinal da bacia do pavimento asfáltico a ser analisado. Sendo assim, as deformações elásticas impostas às bacias de deformações corroboram para a melhor análise das deflexões deflectométricas lidas pela aparelhagem da viga e definir, assim, as bacias de deformação.

A Figura 3 ilustra um esquema ilustrativo da sua aparelhagem.

Figura 3 - Ilustração da aparelhagem da Viga Benkelman



Fonte: DNER (1994)

Essa Figura busca mostrar os principais elementos, da direita para a esquerda, da viga como o Suporte para apoiar a viga juntamente do pé dianteiro e traseiro; o Vibrador que busca vencer o atrito entre as peças móveis e inibir qualquer variação não prevista no extensômetro; o Extensômetro com precisão de décimos de milímetro; a Trava para fixar a parte fixa da viga composta pelo extensômetro e a parte móvel; a Articulação para fazer a ligação da parte móvel com a parte fixa da viga e a Ponta de prova para estar em contato entre os dois pneus do caminhão e auxiliar na leitura do extensômetro.

No ensaio, a ponta de prova é colocada a meia-distância das rodas do semi-eixo traseiro simples de rodas duplas no local onde se deseja medir a deflexão reversível e o caminhão padronizado para este tipo de levantamento tem suas rodas duplas traseiras com pneus calibrados à pressão de 5,6 kgf/cm² ou 80 lb/pol² e carga de 8,2 tf no eixo traseiro simples. Assim que o caminhão estiver posicionado e a viga ajustada, liga-se o vibrador e faz-se a leitura inicial (Lo) no extensômetro na proporção de 1/100 mm, conforme DNER-ME 061/04,

A viga foi projetada para acatar que a área de influência da carga, no instante da leitura inicial, não atinja outras partes do conjunto da viga, como os pés dianteiros. Em seguida, desloca-se o caminhão avante até que o seu peso não exerça mais influência sobre a viga, e faz-se a leitura final (Lf).

Por semelhança de triângulos, calcula-se o valor do deslocamento da ponta de prova da viga considerando a deflexão do pavimento para o mesmo ponto. As Equações 2.2 e 2.3 ilustram os cálculos das deflexões:

$$D = (L_0 - L_f) * a/b \text{ (Equação 2.2)}$$

$$D_i = (L_0 - L_f) * a/b \text{ Equação 2.3)}$$

Onde:

- D = deflexão máxima;
- D_i = deflexões intermediárias, correspondentes aos pontos de leituras intermediárias;
- L₀ = leitura inicial;
- L_f = leitura final; e,
- a/b = relação entre braços = constante da viga.

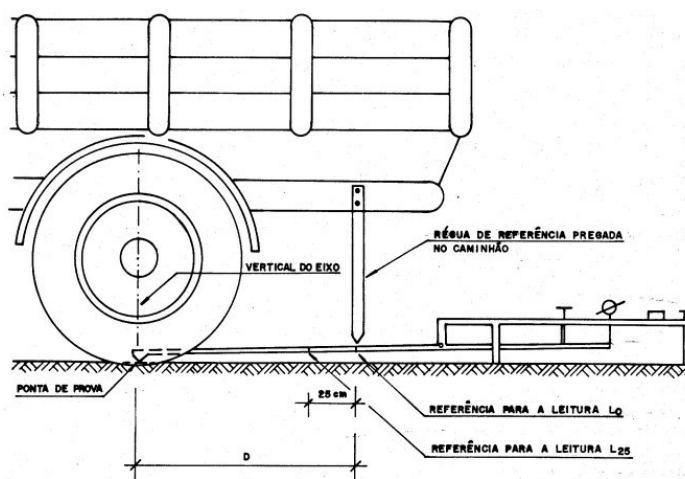
A relação entre braços (a/b), segundo (DNER,1994), poderão ser de 2/1, 3/1 ou 4/1 e a execução do ensaio da viga Benkelman é descrita a seguir, conforme (DNER, 1994):

1. Posicionamento do caminhão ao eixo ortogonal da pista
2. A ponta de prova da viga será colocada no meio da roda dupla do caminhão sobre o ponto selecionado. O perfeito posicionamento da ponta de prova da viga, no eixo traseiro vertical do caminhão, deve possuir um sistema de referência relacionando a sua posição com o caminhão
3. A trava da viga deve ser liberada para que a leitura possa ser feita e o extensômetro ficará na metade de seu curso aproximadamente em função do pé traseiro e realizar a leitura inicial (L₀) quando o extensômetro mostrar leituras com variações menores do que 0,01 mm/min ou após ter passado 3 minutos a partir da ligação do vibrador.
4. O caminhão movimentará para frente 10 metros, a partir do eixo de referência, e será feita a leitura final (L_f) quando o extensômetro indicar leituras menores do que 0,01 mm/min ou após ter passado 3 minutos a partir da ligação do vibrador.

5. Transportar a viga até o próximo ponto a ser lido a deflexão e, após a leitura final, desligar o vibrador e prender novamente a parte móvel da viga juntamente da sua trava e verificar, antes de levantar o equipamento, se a viga está com suas partes móveis e fixas travadas.

O raio de curvatura da bacia de deflexão pode ser realizado uma leitura adicional deslocando-se o eixo das rodas duplas do caminhão 25cm à frente do ponto de prova do pavimento. A Figura 4 ilustra o procedimento de ensaio de Viga Benkelman em função do caminhão de eixo com roda dupla:

Figura 4 - Ilustração da posição de ensaio do aparelho de Viga Benkelman



Fonte: DNER (1994)

2.1.2.2 FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)

O ensaio para avaliação estrutural do pavimento denominado FWD possui grande aceitação no que tange a análise dos deflectômetros de impacto. Esse equipamento possui grande produtividade, assertividade em seus resultados e versatilidade sendo, assim, utilizado no Brasil com mais frequência nos últimos anos, de acordo com Luis (2009).

No Brasil, o FWD foi introduzido no final da década de 80 e são utilizados 8 modelos de equipamentos, como seis da empresa Dynatest (Estados Unidos) e dois do tipo KUAB (Suécia).

De acordo com (Tholen et al, 1985), os equipamentos possuem semelhanças em seu uso, porém existem 3 diferenças importantes que podem ser:

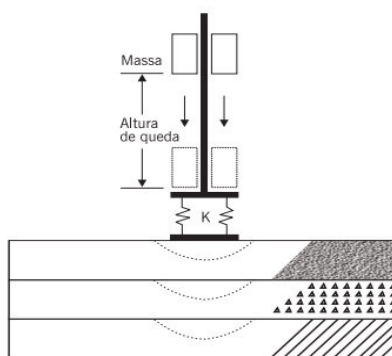
- Tipo de sensor, chamado de transdutores, para medir as deflexões como :geofones, LVDTs e acelerômetros.
- Forma de geração de impulso em função dos pesos acoplados ao equipamento, como um ou dois pesos.
- Forma de distribuição de carga no pavimento para análise.

O FWD é majoritariamente um equipamento de impacto projetado para simular o efeito de uma passagem de solicitação de cargas sobre as camadas do pavimento asfáltico a ser analisado. O impulso de carga recebido pelo pavimento através do equipamento é lido em formato de onda semelhante a uma solenóide, conforme Borges (2001).

Conforme (Cardoso, 1999) o impulso gerado pelo equipamento corresponde a energia potencial da massa antes de sua queda com o desdobramento do trabalho pelos amortecedores de borracha depois da queda e, assim, pode-se conhecer a força do pico exercida sobre o pavimento.

A Figura 5 ilustra um esquema do sistema massa-mola proposto para a aplicação do ensaio de aplicação de placa em função da massa e altura de queda.

Figura 5 - Ilustração do sistema massa-mola para o ensaio de FWD



Fonte: Bernucci *et al* (2010)

A Equação 2.4 ilustra a fórmula utilizada para cálculo da força de pico:

$$F = \sqrt{2Mghk} \text{ (Equação 2.4)}$$

Onde:

- F = força de pico;
- M = massa do peso que cai;
- g = aceleração da gravidade;
- h = altura de queda; e,
- k = constante de mola do sistema de amortecedores.

A força de pico é a carga teórica aplicada ao pavimento por meio da placa de carga e calculada através da energia potencial. O valor da carga real aplicada ao pavimento é registrado automaticamente pela célula de carga e está em função da massa, altura de queda, rigidez e temperatura do pavimento. Dessa forma, quanto mais rígido o pavimento, maior será a carga real para uma dada massa e altura de queda de ensaio.

Além disso, o pico das deflexões apresenta uma defasagem em relação à carga, sendo maior quanto mais longe estiver o medidor do seu respectivo deslocamento.

A defasagem de leituras em relação à carga também possui influência da duração de carga aplicada. Portanto, de acordo com (Medina, 1997) a duração da carga aplicada é da ordem de 30ms no Dynatest e de 34 a 50ms no KUAB, o que correspondente a uma roda com velocidade entre 60 e 80 Km/h. A média de produção deste tipo de equipamento é de 500 a 700 pontos ensaiados por dia.

Os equipamentos que fazem as leituras das deflexões são chamados de transdutores de velocidade e são chamados de LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ou sismômetros e geofones, respectivamente, para KUAB e Dynatest. Os geofones ou LVDT e as células de carga são acopladas a um computador por um cabo de múltiplos sinais que realizará o processamento das leituras dos deflectômetros.

A temperatura na qual está sendo realizado o ensaio e da superfície do pavimento também é medida através de um termômetro que está vinculado ao computador utilizado para o ensaio.

De acordo com Rocha Filho e Rodrigues (1996), a escolha mais acertada para o posicionamento dos sensores é em função dos parâmetros de rigidez e das espessuras das camadas do pavimento que será avaliado, pois esses parâmetros podem influenciar os resultados obtidos na retroanálise para os módulos de elasticidade dos materiais.

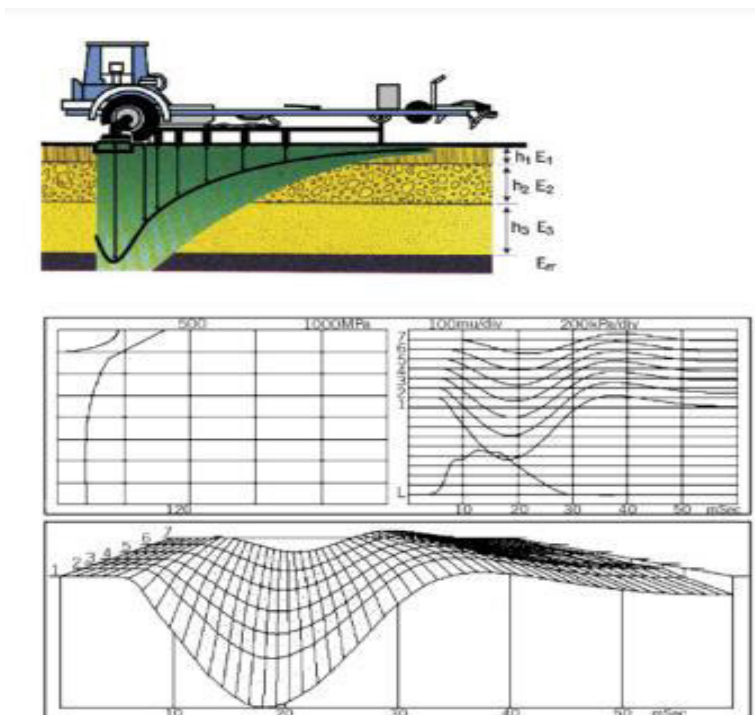
Além disso, o ensaio de FWD permite que se aplique diferentes níveis de carregamentos sobre a superfície do pavimento em uma mesma estação de ensaio levando em conta os componentes de altura de queda, sistema de amortecedores e massa do peso utilizado no conjunto para aplicar a carga.

De acordo com (Medina *et al*, 1994), o ensaio possui algumas limitações como a interferência da leitura dos sensores de deflexão pela presença de uma camada rígida na estrutura do pavimento e a presença de solos saturados ou nível d'água ocultam os resultados reais de deflexão e mostram a presença de um material rígido.

Paralelamente as considerações acima feitas, pelo mesmo autor, o ensaio, porém, possui aspectos positivos como: a acurácia e repetibilidade na medida de deflexões e cargas; redução ou eliminação de ensaios destrutivos, a rápida variação de aplicação de carga que pode ser feita para avaliar a não linearidade no comportamento tensão-deformação das camadas do pavimento.

A Figura 6 ilustra o esquema de medidas para o uso do equipamento FWD e as leituras internas realizadas pelos sensores de deflexão, como geofones ou LVDT.

Figura 6 - Ilustração do Esquema de Leituras e Aplicação de Carga do Ensaio de FWD



Fonte: Bernucci *et al* (2010)

De acordo com a norma brasileira (DNER-PRO, 1996), o ensaio busca encontrar as deflexões recuperáveis na superfície do pavimento com o deflectômetro de impacto do tipo FWD. Dessa forma, é evidente que as leituras dos equipamentos devem ser feitas com a maior precisão possível e, assim, os deflectômetros devem estar corretamente calibrados.

A calibração dos equipamentos é de suma importância para garantir a veracidade das leituras obtidas pelos geofones ou LVTD. De acordo com (Borges, 2001) a calibração dos equipamentos que compõem o FWD deve ser periódica e consoante com o Protocolo de Calibração FWD do Programa SHRP (LTTP) e devem estar submetidos a dois tipos de calibração, como a calibração relativa e absoluta.

A calibração relativa é para garantir o uso dos equipamentos do FWD de forma funcional e a absoluta é para atestar que os valores encontrados nos geofones ou VLDT estão de acordo com a medição real feita no local da calibragem.

As etapas sucessivas do ensaio de FWD consoante a norma (DNER-PRO, 1996) podem ser discriminadas a seguir:

- a) soltar as travas de transporte;
- b) ligar todo o sistema;
- c) abrir arquivo no computador para armazenar os dados;
- d) executar as operações de medidas na superfície do pavimento;
- e) fechar arquivo no computador utilizado para armazenar os dados;
- f) desligar todo o sistema;
- g) acionar as travas de transportes.

As deflexões de ensaios DF1, DF2, DF3 ... DF_n são computadas em 0,001mm

Além disso, os equipamentos utilizados no ensaio são:

- a. Um veículo propulsor com controle do sistema de cargas hidráulicas, da geração de energia e dados.
- b. O equipamento FWD instalado em um carrinho do tipo reboque tracionado através de um veículo, com placa de carga e barra de suporte dos sensores.
- c. Sistema de aquisição de dados contínuos composto por célula de carga, odômetro de precisão, termômetros e sensores.

2.2 AVALIAÇÃO FUNCIONAL DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Os critérios de avaliação para pavimentos são influenciados, em sua grande maioria, pelos aspectos funcionais do pavimento asfáltico. Bernucci *et al* (2010) descrevem que esses critérios são influenciados, respectivamente, pelo conforto do usuário quanto ao rolamento e capacidade de carga a qual está vinculada diretamente ao dimensionamento do pavimento.

Os pavimentos asfálticos, em geral, vão possuir muitos defeitos superficiais, como trincas, ao longo de sua vida útil e podem ser avaliados conforme terminologia da norma DNIT 005/2003. Essa terminologia define muitos defeitos comuns em pavimentos, porém, somente às trincas, fendas e afundamentos são as patologias funcionais mais comuns no cotidiano dos usuários.

Além disso, Bernucci *et al* (2010) explicam que esses defeitos funcionais dos pavimentos como as fissuras, trincas e afundamentos são vistos majoritariamente a olho nu na superfície dos pavimentos asfálticos flexíveis e estão relacionados com os danos ou deterioração da superfície na qual está sujeito a ação de cargas de tráfego variáveis ao longo de sua vida útil.

2.2.1 PATOLOGIAS FUNCIONAIS MAIS COMUNS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

As Patologias Funcionais dos pavimentos asfálticos são recorrentes ao longo de toda a sua vida útil e não quer dizer, majoritariamente, que o dimensionamento foi precário, mas, sim, que os materiais se deformam ao longo do tempo em função de sua rigidez e características.

As patologias mais comuns visualizadas em pavimentos asfálticos flexíveis são as fendas – classificadas como fissuras e trincas- e afundamentos.

FENDAS

As fendas podem ser definidas como descontinuidades na superfície do pavimento que contribuem para aberturas de maior ou menor porte, conforme DNIT 005/2003. Essas fendas são classificadas em fissuras e trincas.

As fissuras podem ser fendas de largura capilar posicionadas transversal, obliquamente ou longitudinalmente ao longo do pavimento.

As fissuras são fendas incipientes que ainda não causam problemas funcionais ao revestimento, não sendo assim consideradas quanto à gravidade nos métodos atuais de avaliação das condições de superfície, conforme DNIT 005/2003.

As Trincas são definidas como fendas facilmente visíveis e com aberturas superiores às da fissura. Elas podem ser classificadas como FC-1, FC-2 e FC-3, conforme DNIT 005/2003. A explicação dessas categorias está a seguir:

Classes

FC-1: são Trincas com abertura superior à das fissuras e menor do que 1,0 mm.

FC-2: são Trincas com abertura superior a 1,0 mm e sem erosão nas bordas

FC-3: são Trincas com abertura superior a 1,0 mm e com erosão nas bordas

Formas de Trincas

a) Trinca isolada

Trinca transversal

Trinca isolada com direção predominantemente ortogonal ao eixo da via. Denomina-se trinca transversal curta (TTC) quando apresentar extensão menor que 1 m, e trinca transversal longa (TTL) quando maior que 1 m, conforme DNIT 005/2003.

Trinca longitudinal

Trinca isolada com direção predominante paralela ao eixo da via. Denomina-se trinca longitudinal curta (TLC) quando apresentar extensão menor que 1 m, e trinca longitudinal longa (TLL) quando maior que 1 m, conforme DNIT 005/2003.

Trinca de retração (TRR)

Trinca isolada não atribuída aos fenômenos de fadiga, mas sim a retração térmica do revestimento ou das camadas de base subjacentes, conforme DNIT 005/2003.

b) Trinca interligada

Trinca tipo “Couro de Jacaré”

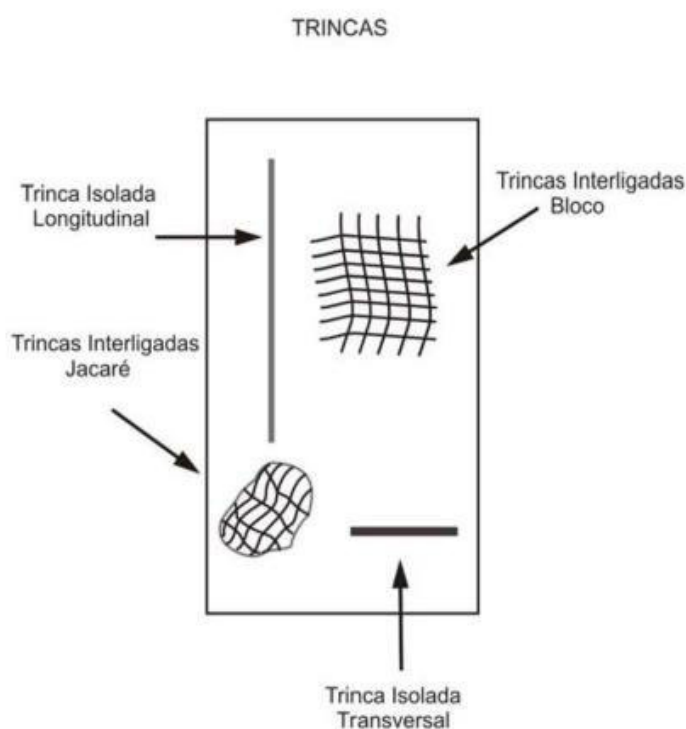
Conjunto de trincas interligadas sem direções preferenciais, assemelhando-se ao aspecto do couro de jacaré, conforme DNIT 005/2003.

Trinca tipo “Bloco”

Trincas interligadas semelhante a blocos de lados bem definidos, podendo apresentar (TBE), ou não (TB), erosão nas bordas.

A Figura 7 ilustra algumas trincas relacionadas aos defeitos superficiais em pavimentos flexíveis

Figura 7 - Trincas de defeitos superficiais em pavimentos flexíveis



Fonte: DNIT (2003)

Além disso, as trincas, segundo Adlinge e Gupta (2013), podem favorecer o aumento de umidade nas camadas subjacentes ao pavimento asfáltico e cavidades ocasionando, assim, um enfraquecimento expressivo da resistência dos materiais utilizados.

AFUNDAMENTOS

Afundamentos são deformações permanentes caracterizadas por depressões superficiais, longitudinais ao eixo da via, que podem estar acompanhadas de solevamento (erguimento) da camada asfáltica. Ademais, eles podem ser classificados em afundamento plástico ou afundamento por consolidação, conforme DNIT 005/2003.

Afundamento plástico

É o afundamento causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito, acompanhado de solevamento. Se a sua extensão for de até 6,0 m é denominado afundamento plástico local (ALP); caso a extensão seja superior a este valor e localizar-se ao longo da trilha de roda, é nomeado afundamento plástico da trilha de roda (ATP), conforme DNIT 005/2003.

Afundamento de consolidação

É aquele causado pela consolidação diferencial ou fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito, não sendo acompanhado de solevamento. Dessa forma, Afundamentos com extensões inferiores a 6,0 m são denominados afundamento local de consolidação (ALC). No entanto, caso a extensão ultrapasse este valor e ocorrer ao longo da trilha de roda, denominam-se afundamentos de consolidação da trilha de roda (ATC), conforme DNIT 005/2003.

2.3 RETROANÁLISE

A retroanálise é um recurso em que são testados analiticamente os valores de módulo de elasticidade das camadas do pavimento para que as respostas das deflexões simuladas impostas por um carregamento conhecido, se aproximem ao máximo daquelas obtidas em campo, conforme Balbo (2007).

A retroanálise surgiu com a necessidade de estimar módulos resilientes a partir de conhecimentos sobre deformação na superfície da bacia de deflexão em função de alguma solicitação imposta, espessura das camadas do pavimento e posição da camada na estrutura do pavimento, de acordo com Balbo (2007).

O levantamento de dados proveniente de ensaios não destrutivos que analisam estruturalmente as camadas dos pavimentos, em função das deflexões sofridas, é importante para que a retroanálise consiga estimar uma bacia de deflexão teórica muito próxima com a bacia de campo.

De acordo com (Medina & Motta, 2015), o uso da retroanálise busca obter o módulo de resiliência das camadas granulares e do solo de fundação. Assim como, saber a influência em porcentagem, de cada camada na deformação elástica do pavimento.

A avaliação estrutural do pavimento e a retroanálise das bacias de deflexões buscam conciliar os dados obtidos pelos ensaios não destrutivos, como Viga Benkelman e FWD, a fim de que o módulo de resiliência da retroanálise possa ser suficientemente próximo a realidade da pista em campo.

O uso da retroanálise auxilia na gestão de tempo de processamento de dados e corrobora para análises técnicas com rápido tempo e precisão. Como cita (Bernucci *et al*, 2010), os dados obtidos com a retroanálise auxiliam no ganho de tempo nos projetos e diminui as amostras que serão coletadas em campo contribuindo, assim, para que os projetos de pavimentação tenham mais confiabilidade e durabilidade.

O uso da retroanálise busca, sobretudo, estimar a vida útil remanescente do pavimento já executado em função dos módulos de deformabilidade elástica obtidos. Além disso, segundo Nobrega (2003) a retroanálise é utilizada com os objetivos de estimar o módulo de resiliência nas condições que os materiais se encontram em campo e minimizar o número de sondagens de espessuras e coletas de amostras para determinação dos parâmetros de resiliência que são difíceis de serem obtidos em laboratório, além de ter um custo-benefício muito maior.

Os materiais granulares possuem uma deformação mais elevada e são responsáveis pelo comportamento elástico do pavimento, quando submetido a solicitações de cargas em sua superfície, e as deflexões, em sua superfície, são refletidas para todas as camadas do pavimento asfáltico.

Segundo Medina e Motta (2015), a capacidade do pavimento em refletir as deflexões impostas a ele sob a sua superfície estão ligadas as deformações das camadas granulares, em função da rigidez do material utilizado.

Portanto, a retroanálise é uma forma inversa de dimensionar um pavimento novo ou de reforço, pois o pavimento redimensionado estará teoricamente corrigido das deformações causadas por um carregamento conhecido, ou seja, redimensionado com a menor taxa de erros.

A retroanálise caracteriza-se pela determinação analítica dos módulos elásticos, como rigidez e elasticidade, de todas as camadas do pavimento e subleito a partir de bacias deflectométricas (FRITZEN, 2005).

O uso de realizar a estimativa teórica mais próxima do real possui a limitação que existem variações das propriedades resilientes para uma mesma camada. Essas variações, conforme (BALBO, 2007), estão relacionadas com a temperatura de operação e profundidade da camada; o módulo de resiliência dos materiais é alterado pouco a pouco, ao longo do tempo, conforme ciclo físico anual da natureza, como umidade e temperatura, além da superfície do pavimento estar sujeito a oxidação.

De acordo com (ALBERNAZ, 1997), as vantagens da retroanálise podem ser a análise comparativa do comportamento estrutural dos segmentos de uma mesma ou diferente rodovia, elaboração de projetos mais confiáveis, uso de dados para o projeto de drenagem de rodovias sobre camadas rígidas de subleito e a elaboração de projetos de pavimentação mais duráveis.

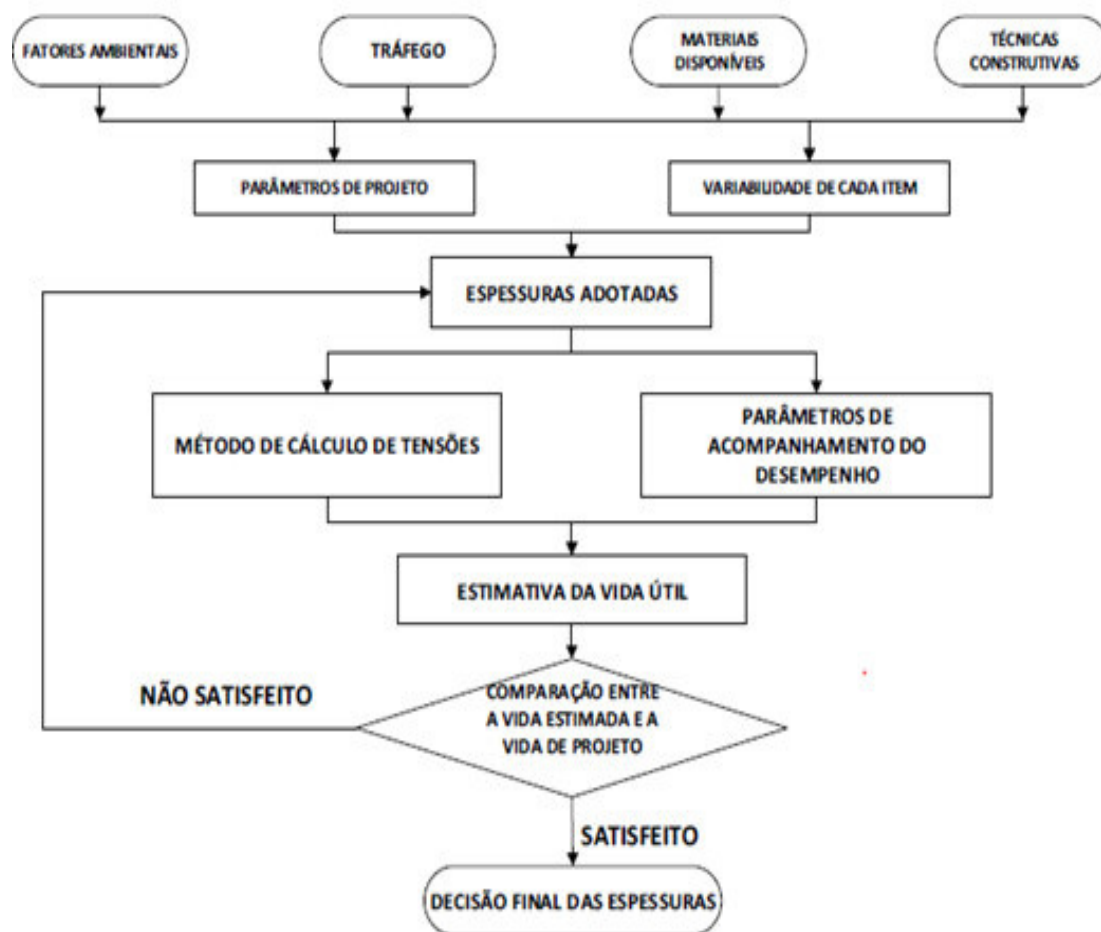
2.4 NOVO MÉTODO BRASILEIRO PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

O Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos, denominado MeDiNa, surgiu com a ideia de projetar e dimensionar pavimentos asfálticos brasileiros levando em consideração as características dos materiais e tráfego do local para proporcionar pavimentos mais duráveis e de qualidade condizente com a região de implantação.

Esse método foi desenvolvido através de uma pesquisa realizada entre 2015 e 2018 pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Alberto Luiz de Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O trabalho é intitulado como *Execução de estudos e pesquisas para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos* (IPR, 2018).

Para Motta e Medina (2015), o procedimento para do método mecanístico-empírico segue o fluxograma da Figura 8, onde é possível verificar que fatores como ambientais, tráfego, materiais e técnicas construtivas influenciam diretamente na aplicação do método.

Figura 8 - Fluxograma para método mecanístico empírico



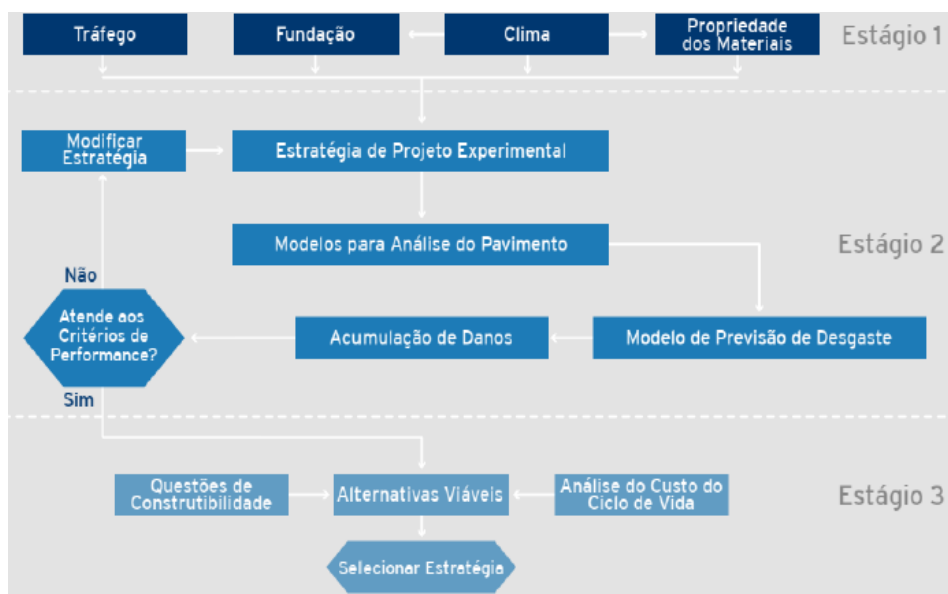
Fonte: MOTTA e MEDINA (2015)

O novo método também se caracteriza por compatibilizar as deformações impostas pelo tráfego e clima, em função das solicitações sobre a estrutura do pavimento, com as tensões resistentes dos materiais utilizados. Dessa forma, é possível conhecer o comportamento da estrutura quando solicitada por cargas e, assim, verificar a possibilidade de alterar os materiais constituintes a fim de obter o melhor desempenho possível.

O fluxograma do método mecanístico-empírico é baseado também no fluxograma *Mechanist-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) ou Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos feito nos Estados Unidos e normatizados pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO.

A Figura 9 ilustra o fluxograma MPEDG, onde é possível verificar as influências dos parâmetros de tráfego, fundação, clima e propriedades dos materiais.

Figura 9 - Fluxograma MPEDG



Fonte: CNT (2015)

- No 1º estágio é avaliado a composição do tráfego, os materiais do pavimento e o subleito.
- No 2º estágio é feita uma análise da seção do pavimento em função da resposta da interação entre as camadas e do aparecimento de defeito ao longo do tempo.
- No 3º estágio é a análise técnica feita para tomar soluções estratégicas caso, no estágio 2, tenha alguma incoerência quanto a vida útil do pavimento e das soluções estrategicamente viáveis.

2.4.1 – BackMeDiNa

O software de retroanálise BackMeDiNa foi desenvolvido através dos estudos provenientes do Projeto DNIT TED nº682/2014. Esse programa consegue retroanalisar uma estrutura do pavimento com até 5 camadas, além do subleito, considerando bacias com até 9 pontos de deflexões medidas em campo com equipamento FWD.

O software aplica o método iterativo para obter os módulos de resiliência das camadas, utilizando o módulo AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), a partir de dados fornecidos pelo usuário como: as espessuras das camadas, as condições de atrito ou aderência entre as camadas, módulos de resiliência iniciais e os coeficientes de Poisson relacionados com a rigidez dos elementos que constituem as camadas do pavimento.

O software BackMeDiNa utiliza o módulo de AEMC para encontrar os valores de módulo de resiliência baseados na análise elástica e, assim, os valores de módulo de resiliência irão variar para encontrar o que mais se aproxima do valor possível de campo.

Além disso, de acordo com (Franco e Motta, 2018), os dados são processados pela raiz média quadrática das diferenças entre a bacia medida e a calculada por análise elástica linear.

De acordo com Nery (2020), o uso das deflexões aferidas com o FWD é mais eficiente do que aquelas medidas com o ensaio de viga Benkelman e, assim, existe a possibilidade de melhor diagnóstico da condição estrutural do pavimento, além da elaboração de um projeto de reforço mais adequado para o pavimento em análise.

Dessa forma, o uso do software BackMeDiNa permite avaliar todas as bacias deflectométricas levantadas em um mesmo segmento homogêneo de uma rodovia e, realizar o diagnóstico da estrutura do pavimento

O BackMeDiNA, conforme os estudos de Camarini, Silva Junior e Fontenele (2019), consegue retroanalisar pavimentos com até 5 camadas, além do subleito, a partir de dados de bacias de deflexão obtidas com o FWD e até 9 pontos de medidas por seção.

A avaliação do erro após a retroanálise do software, segundo Franco e Motta (2018) é calculado pelo método da raiz do valor quadrático médio ou RMS, ou seja, quando o erro é superior a 10 μm , o programa marca a seção com a cor vermelha para indicar que não há uma retroanálise satisfatória.

No entanto, quando o erro é inferior a 10 μm e superior a 5 μm , o programa marca a seção com cor amarela indicando que a retroanálise conseguiu se enquadrar em uma correlação adequada e quando o erro é inferior a 5 μm , a cor é verde é o indicativo de que a retroanálise conseguiu uma boa correlação.

A Figura 10 ilustra a interface geral do programa BackMeDiNa, contendo seções da estrutura do pavimento, para a estruturação de camadas, deflexões calculadas, bacias e estacas das bacias de deflexão e outros parâmetros gerais.

Figura 10 - Interface geral do programa BackMeDiNa

Fonte: autoria própria (2021)

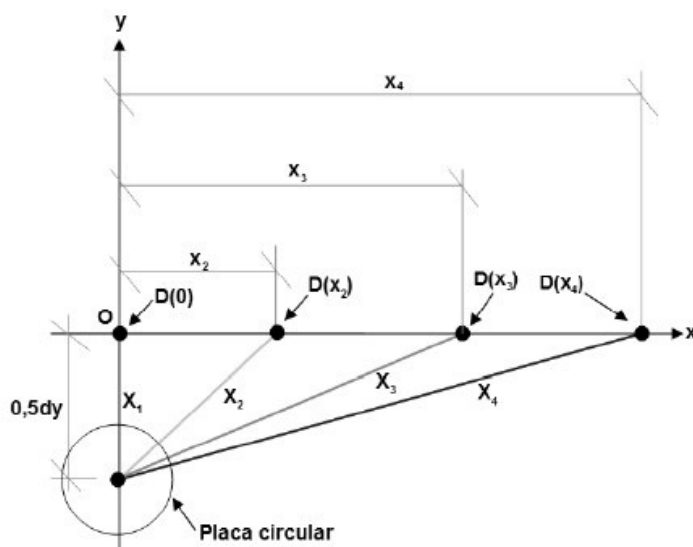
De acordo com Souza Júnior (2018), a inserção de dados no programa BackMeDiNa é feita baseado em uma planilha em Excel, no formato .csv, para importar parâmetros referentes à seção avaliada em campo e dados que se referem ao levantamento deflectométrico das bacias.

Esses dados utilizados pelo programa, para retroanalisar as bacias de deflexão elástica, são baseados nos fatores do carregamento aplicado, temperatura do ar e pavimento, localização da rodovia, espessuras das camadas em função da rigidez, trilhas referentes a deflexão do pavimento.

A Figura 11, conforme Theisen *et al* (2009), mostra a correlação das novas distâncias em relação ao prato de FWD com a aplicação uniaxial da carga, ou seja, denota-se por “ dy ” a distância entre os centros de placas circulares; $D(x_i)$ a distância do centro geométrico “O” do carregamento e, devido a simetria do carregamento, é considerado apenas a atuação de uma das rodas implicando em $0,5 D(X_i)$.

Ademais, o processo de dividir por dois as deflexões diz respeito à aplicação de carga considerar somente uma aplicação e não duas como os pneus do caminhão de 8.2tf do ensaio de Viga.

Figura 11- Ilustração da correlação de distâncias entre o centro de placa circular do carregamento



Fonte: Theisen *et al* (2009)

A conversão das distâncias entre as bacias de deflexão lidas pela Viga Benkelman para FWD será realizada através da Equação 2.5 proposta por Theisen *et al* (2009):

$$Xi = [(xi)^2 + (0,5d cg)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Onde:

Xi = distância calculada;

xi = distância entre os pontos da bacia de deflexão;

$d cg$ = distância entre o centro geométrico das placas do ensaio de FWD

Além disso, o autor Bueno (2016) indicou a Equação 2.6 proposto pelo DER-SP que permite calcular a deflexão para a temperatura de referência de 25°C em função da temperatura da superfície e espessura do pavimento asfáltico.

$$Xi = \frac{D}{\left\{ \left[\frac{h_{CA}}{1000} \cdot (T-25) \right] + 1 \right\}} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Onde:

$D_{25^\circ C}$ = deflexão corrigida para a temperatura de 25°C (0,01mm);

D = deflexão medida (0,01mm);

h_{CA} = espessura da camada asfáltica (cm);

T = temperatura na superfície do pavimento no momento do ensaio (°C).

Um outro autor denominado Borges (2001) fez uma observação importante a respeito dos métodos para correlacionar as deflexões de VB e FWD, pois a equação linear ($y = a \cdot x + b$), que considera o intercepto (b), não influencia sensivelmente as correlações.

O autor Borges (2001) explicita a Equação 2.7 de correlação que melhor se adequa aos revestimentos com 5cm de espessura e camadas granulares, porém essa equação levou em conta os materiais de vários segmentos, utilizados pelo autor, para correlacionar na equação citada.

$$D_{vb} = 1,193 \cdot D_{fwd} \quad (\text{Equação 2.7})$$

A Figura 12 ilustra uma planilha, em Excel, que possui os parâmetros de temperatura do ambiente e pavimento, carga, estacas e valores das coletas das deflexões ao longo do ensaio realizado.

Figura 12 - Modelo de planilha para inserção de dados no software BackMeDiNa

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	BACKMEDINA														
2	SEÇÃO:	Trecho 3/MG													
3	RAIO (cm):	15													
4	Data de Execução	Temp. Do	Temp. Do	Carga	Estaca - N	Estaca - D	Estaca - F	Estaca - Tr	d0	d20	d30	d45	d60	d90	d120
5	01/06/2017	30	29	4121	83	800	1 Sul	Externa	401	347	223	126	81	62	51
6	01/06/2017	31	30	4186	83	900	1 Sul	Externa	364	301	202	123	80	56	45
7	01/06/2017	31	29	4099	84	0	1 Sul	Externa	531	408	286	188	113	74	56
8	01/06/2017	31	30	4128	84	100	1 Sul	Externa	490	396	276	172	115	84	63
9	01/06/2017	31	31	4150	84	200	1 Sul	Externa	505	392	276	174	102	72	53
10															
11															

Fonte: Souza Júnior (2018)

Dessa forma, após a inserção de dados no programa, ele irá calcular os módulos de resiliência da estrutura do pavimento e analisará os erros. Os erros são variados em intervalos de 15 e 9 análises, respectivamente, para teores baixos de erros e elevados. Ademais, para erros elevados, a faixa de cada módulo calculado é de 80% do valor indicado pelo programa e, para erros menores, essa faixa cai para 25%.

Segundo (FRANCO, 2018), quando o usuário pressiona para retroanalisar a bacia de deflexão, o programa irá realizar todos os cálculos e aproximações possíveis para que o resultado final seja mais coerente com a realidade, ou seja, menor valor quadrático médio (RMS). Portanto, o usuário deverá clicar várias vezes no botão de retroanalisar a fim de não se ter erros RMS acima de 10%.

2.4.2 –MeDiNa

O Novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, apelidado de MeDiNa, foi desenvolvido através de uma parceria do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia do Rio de Janeiro (COPPE-RJ) e o Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR), com a colaboração da Rede Temática de Asfaltos da Petrobrás, pois estava sendo necessária uma atualização da norma utilizada no Brasil que ainda é da década de 1960.

A denominada rede temática de asfaltos, que é formada por várias universidades e pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), iniciou, em 2009, um projeto para realizar um banco de dados de várias regiões brasileiras a fim de utilizar esses dados para o dimensionamento de pavimentos de acordo com cada região brasileira. Além disso, o software busca auxiliar a melhor escolha possível para o ligante.

Nesse sentido, o programa PROMEDINA, realizado pelo DNIT, auxilia no monitoramento dos segmentos experimentais, através das parcerias com universidades brasileiras, visando avaliar o comportamento do pavimento e aperfeiçoar a calibração do novo software.

A análise da fadiga, segundo Franco e Motta (2018), está relacionada com a curva de fadiga das misturas asfálticas e esta é obtida a partir de ensaios de carregamento repetido, à tensão constante, como o ensaio de compressão diametral de tração indireta. Dessa forma, o *software* MeDiNa permite adotar a seguinte relação do Número de Ciclos e Fadiga, conforme Equação 2.7:

$$N_{fad} = k_1 \cdot \epsilon_t^{k_2} \quad (\text{Equação 2.7})$$

Onde:

N_{fad} = número de ciclos;

ϵ_t = deformação específica resiliente de tração;

k_1 e k_2 = parâmetros da curva de fadiga.

Além disso, as quatro misturas asfálticas teóricas, que estão contidas na base de dados do MeDiNa, e variam de Classe 1 a Classe 4 abrangem, consoante Souza Júnior (2018) e Lopes (2019), uma grande faixa de parâmetros de fadiga variando o módulo de resiliência de 5764 MPa na Classe 1 até 10492 MPa na Classe 4. Também é importante citar que a Classe 1 é considerada a menos resistente dentre as outras classes.

A Figura 13 ilustra a interface geral do programa, com versão de 2020, para alterar a estrutura do pavimento.

Figura 13 - Ilustração geral do programa MeDiNa para alterar estrutura do pavimento

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

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

Carga de eixo (ton): 8,20
 Pressão de pneus (MPa): 0,56
 Sx (cm): 32,40
 Área (cm²): 366,07
 Raio (cm): 10,79

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Primário
 VMD (1º ano): 1370
 FV: 1,000
 N anual (1º ano): 5,00e+05
 % Veículos na faixa de projeto: 100

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

Fonte: MeDiNa (2020)

De acordo com Silva (2018), o cálculo de tensões no interior da camada (AEMC) faz parte da análise do programa para dimensionar um novo pavimento. Além disso, o software também pode ser usado para dimensionar um novo pavimento de projeto ou um pavimento já existente através da retroanálise.

O método de trabalho AEMC baseia-se na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos. O benefício de combinar carregamentos, com mais de uma roda por meio da superposição e da hipótese de elasticidade linear, também é possível obter o estado de tensão, deformação e deslocamentos em qualquer ponto a ser estudado.

A ruptura para o método MeDiNa está associada aos danos de fadiga e deformação permanente e, assim, o entendimento desses processos é feito através da previsão de desempenho relacionando a área trincada do pavimento. Dessa forma, na metodologia MeDiNa, o revestimento asfáltico é dimensionado unicamente à base dos danos por fadiga que é evidenciada por trincas e fissuras na superfície do pavimento e pode ser calculada de acordo com a Equação 2.8.

$$ATR (\%) = \frac{N_{trincado}}{N_{total}} \cdot 100 \text{ (Equação 2.8)}$$

Onde:

ATR (%) = Área Trincada em porcentagem;

Ntrincado = Número de células trincadas;

Ntotal= Número total de células do segmento experimental.

Segundo o manual do software MeDiNa, o valor máximo de Área Trincada (ATR) o qual é estabelecido pelo programa é de 30%. E, conforme Silva (2018), o denominado *Flow Number* é o ciclo da curva de deformação plástica vertical acumulada por número de ciclos e pode ser definido como o ponto onde a taxa de deformação é mínima durante o ensaio uniaxial de carga repetida.

O software MeDiNa irá apresentar, após as análises de desempenho do pavimento ou realização de um novo dimensionamento, valores de *Flow Number* como propriedades da camada asfáltica estudada para o controle de qualidade da obra,

O software MeDiNa irá ficar verificando a estrutura pelo critério da deformação permanente total. No entanto, segundo FRANCO (2018), uma vez que critério da deformação permanente não seja atendido, então o programa irá aumentar gradativamente a espessura da camada marcada, em intervalos fixos de 0,5cm, em camadas asfálticas, e 1cm, nas demais camadas, até que o critério em questão ser atendido. Além disso, a verificação da vida útil do pavimento asfáltico é feita através de inspeção no Catálogo de Soluções para Pavimentos Flexíveis do DNIT.

Os resultados gerados pelo MeDiNa são feitos em três relatórios, conforme FRANCO (2018), como Resumo da Deformação Permanente e Bacias de Deflexão, Evolução Mensal de Danos e Relatório Completo da Análise. O primeiro item apresenta um resumo da deformação permanente na estrutura; o segundo apresenta os resultados do comportamento da área trincada, deformação permanente e do Módulo Sigmoidal quando houver camadas cimentadas na estrutura; o terceiro apresenta o resultado completo da análise feita pelo software.

A calibração da função de transferência é feita para relacionar as tensões que se desenvolvem no interior do pavimento e a resistência a fadiga do revestimento asfáltico com a área trincada desenvolvida ao longo do tempo em função do fluxo de carros sobre a sua superfície. Dessa forma, conforme Fritzen (2016), a correlação entre o dano por fadiga e a área trincada foi desenvolvida por ele para 6 tipos de misturas asfálticas para 45 pistas experimentais e é usada, especificamente, no método de dimensionamento MeDiNa.

A Equação 2.9 ilustra a correlação da área trincada e o número N de tráfego adequado para a pista.

$$AT (\%) = \frac{e^{-A} \cdot e^{-B}}{(1 - e^{-B})} \quad (\text{Equação 2.9})$$

Onde:

AT (%) = Área Trincada em porcentagem;

N' = Número equivalente deslocado;

Z e n = Parâmetros da curva sigmoide.

Os parâmetros utilizados na equação acima podem ser calculados através das Equações 2.10 e 2.11 a fim de obter o valor desses coeficientes em função do número de tráfego (N) e da curva sigmoide:

$$A = \frac{(N'-1)^n}{(Z-1)} \quad B = (-1)/(Z-1)^n \quad (\text{Equações 2.10 e 2.11})$$

Onde:

A e B = Coeficiente relacionado à área trincada;

N' = Número equivalente deslocado;

Z e n = Parâmetros da curva sigmoide.

2.5 ESTUDO DE CASO: PISTA EXPERIMENTAL DA CENTRAL DE ABASTECIMENTO DE GOIÁS S.A (CEASA-GO)

O trecho da pista experimental do CEASA-GO foi executado com agregados reciclados oriundos de Resíduos da Construção e Demolição (RCD), conforme relatado por OLIVEIRA (2007). Os estudos de laboratório iniciaram em 2004 e o trecho localiza-se na Rua dos Ciprestes, Setor de Mansões Bernardo Sayão, Goiânia-GO, além de estar situado no acesso de compradores das Centrais de Abastecimento de Goiás S.A. (CEASA-GO).

De acordo com Oliveira (2007), a construção da pista foi realizada nos meses de Novembro e Dezembro de 2003 em decorrência de um programa municipal de gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil e parceria entre a Prefeitura Municipal de Goiânia, FURNAS Centrais Elétricas S.A., a Universidade de Brasília, a Universidade Federal de Goiás e empresários que atuavam na coleta seletiva e reciclagem com materiais provenientes da construção civil da época.

Os agregados utilizados na pista foram decorrentes do processo de britagem em conjunto com resíduos de construção e demolição, como compostos de concretos, materiais cerâmicos e argamassas pela prefeitura municipal. Além disso, as características de projeto da pista experimental são as seguintes:

- Extensão total: 56,00 m;
- Largura da pista de rolamento: 9,00 metros;
- Inclinação transversal da pista = 3%;
- Seção transversal: Mista (corte de 0,40 m no bordo esquerdo e aterro de 1,40 m no bordo direito);
- Espessura das camadas: Sub-base = 15 cm (83% de agregados reciclados e 17% de solo argiloso) e Base = 15 cm (75% de agregados reciclados e 25% de solo argiloso);
- Revestimento: CBUQ - concreto betuminoso usinado a quente, com espessura de 5 cm;

Além disso, de acordo com os dados provenientes de Oliveira (2007), a caracterização dos materiais da pista experimental da CEASA-GO trouxe à tona um material do tipo solo laterítico e foi classificado, no SUCS - Sistema Unificado de Classificação dos Solos, como CL

- Argila arenosa de baixa plasticidade e, segundo a Classificação TRB -*Transportation Research Board*, como A-7-6 (IG = 11) - Solos Argilosos.

Também foram realizados os ensaios da classificação MCT do subleito, para solos tropicais e, segundo essa classificação o solo foi enquadrado no grupo LG' - Solo Argiloso de Comportamento Laterítico ($c' = 1,80$; $d' = 74,40$; $e' = 0,80$ e $P_i = 44,4\%$).

A granulometria do material em tabelas, conforme os dados de Oliveira (2017) estarão no Apêndice B deste trabalho. No entanto, os valores encontrados para os materiais utilizados estão discriminados no Quadro 1 e é possível verificar o peso específico das frações de agregados reciclados, areia, argila e misturas de areia e argilas utilizadas na composição da base e sub-base da pista.

Quadro 1 - Peso específico dos materiais utilizados na pista experimental

Agregados reciclados dos resíduos sólidos	Brita 19 mm	$\gamma = 22,07 \text{ kN/m}^3$
	Brita 9,5 mm	$\gamma = 26,09 \text{ kN/m}^3$
Fração de Areia e Argila dos Agregados	Areia	$\gamma = 26,38 \text{ kN/m}^3$
	Argila	$\gamma = 26,87 \text{ kN/m}^3$
Misturas de base e sub-base	Sub-base	$\gamma = 26,97 \text{ kN/m}^3$
	Base	$\gamma = 27,26 \text{ kN/m}^3$

Fonte: autoria própria (2021)

Os materiais de base possuem as seguintes frações, em porcentagens, a respeito de sua composição como 33% brita 19mm, 33% brita 9,5 mm, 17% de areia e 17% de argila; os materiais de sub-base possuem 25% brita 19 mm, 25% brita 9,5 mm, 25% areia e 25% argila.

Os valores do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), para as camadas de Subleito (Argila), Sub-base e Base, estão explícitos no Quadro 2:

Quadro 2 - Resultados resumidos para as camadas da pista experimental do ensaio de ISC

Amostra	Compactação		CBR (%)	Expansão (%)
	γ_d máx (kN/m ³)	w_{ot} (%)		
Argila	16,40	20,6	13	0,08
Sub-base	18,77	11,8	90	0,04
Base	17,70	14,5	83	0,00

Fonte: Oliveira (2007)

Algumas considerações feitas pelo autor Oliveira (2007) estão discriminadas abaixo:

- Argila do sub-leito e das dosagens com os resíduos;
- Amostras sem reuso;
- A argila foi compactada com a energia do proctor normal;
- A sub-base e a base foram compactadas com a energia do proctor intermediário.

Os valores de correlação da regressão linear para o módulo de resiliência estão em função dos coeficientes k_1 e k_2 para a sub-base, base e sub-leito a partir das Equações 2.12 e 2.13 e 2.14. Ademais, o sub-leito possui duas equações para as energias Proctor Normal e Intermediária.

$$MR = k_1 \sigma^3 \quad \text{(Equação 2.12 – Base e Sub-base)}$$

$$MR = k_2 + k_3 (k_1 - \sigma_d) \rightarrow \frac{\rho}{k_1} > \sigma_d \quad \text{(Equação 2.13 – Sub-leito)}$$

$$MR = k_2 + k_4 (\sigma_d - k_1) \rightarrow \frac{\rho}{k_1} < \sigma_d \quad \text{(Equação 2.14 – Sub-leito)}$$

Onde:

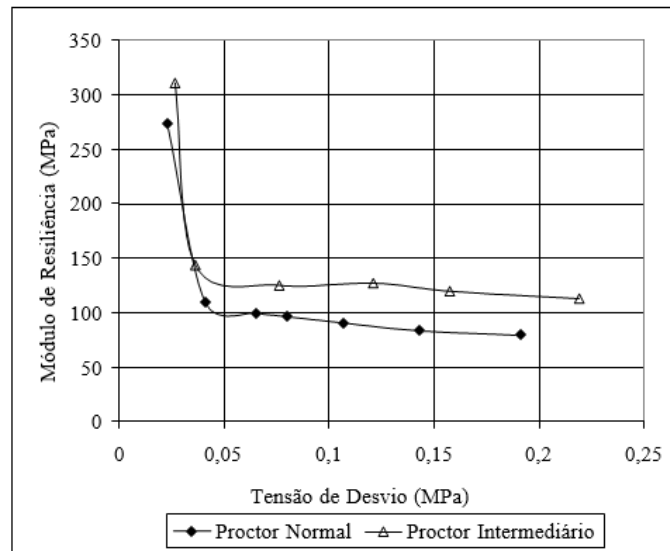
MR = módulo de resiliência;

K_1 , k_2 , k_3 e k_4 = parâmetros de resiliência para solos, sendo k_1 e k_2 válidos para solos argilosos e arenosos e, somente, k_3 e k_4 para solos argilosos ou finos;

σ_d = tensão de desvio.

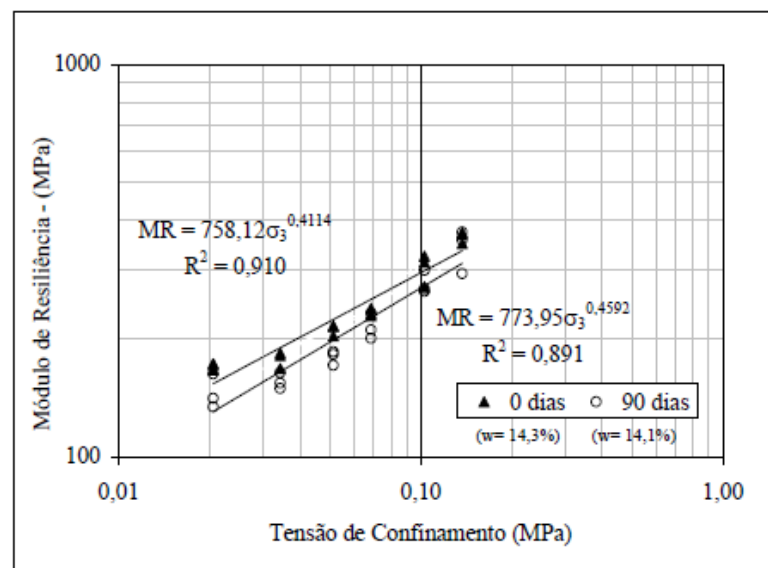
As Figuras 14, 15 e 16 ilustram os gráficos encontrados para os módulos resilientes (MR) realizados para a pista experimental em função, respectivamente, das camadas de Sub-leito, Sub-base e Base. Ademais, o valor máximo de MR para o subleito encontrado para o Proctor Normal, conforme Figura 14, foi de, aproximadamente, 270 MPa.

Figura 14 - Ilustração do gráfico de MR x Tensão de confinamento para o Sub-leito



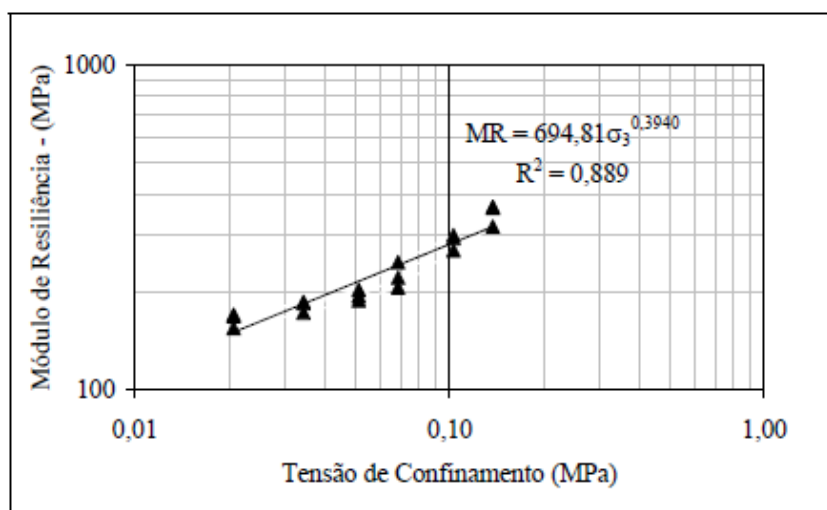
Fonte: Oliveira (2007)

Figura 15 - Ilustração do gráfico de MR x Tensão de confinamento para o Base



Fonte: Oliveira (2007)

Figura 16 - Ilustração do gráfico de MR x Tensão de confinamento para o Sub-base



Fonte: Oliveira (2007)

Os valores do parâmetro de resiliência (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) para as camadas de base, sub-base e subleito estão explícitas no Quadro 3, porém as camadas de base e sub-base possuem, somente, os parâmetros k_1 e k_2 e os parâmetros da camada de subleito considerou a energia Proctor Normal, porque essa foi a energia aplicada na pista experimental para o subleito.

Quadro 3 - Parâmetros de resiliência (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) para as camadas da pista experimental

Camada	K_1	K_2	K_3	K_4
Base	758,12	0,4114	X	X
Sub-base	694,81	0,3940	X	X
Subleito	0,042	101,7	9090,9	183,4

Fonte: Oliveira (2007)

Além disso, naqueles gráficos foi possível verificar a equação de regressão linear, bem como o valor de R^2 que estima o quão próximo estão os dados da reta de regressão, além da relação de cada módulo de resiliência para a tensão de confinamento sendo, assim, todos os valores encontrados em MPa.

Os valores referentes ao o tráfego proposto, para a pista experimental do CEASA-GO, foram coletados e analisados em agosto de 2005. Dessa forma, foi analisado que apenas 5% dos caminhões que trafegavam na pista estavam carregados e os Quadros 4 e 5 ilustram, respectivamente, a contagem de tráfegos, em valores médios diários de tráfego (VDM), e o número de equivalência de tráfego N para as solicitações do eixo padrão de 82 kN na pista experimental calculados com os fatores de carga do USACE.

Quadro 4 - Contagem de tráfego para a pista experimental CEASA-GO – Agosto de 2005

Veículo	Carro de passeio (Leve)	Caminhoneta (Leve)	Ônibus	Caminhão Simples	Caminhão Duplo	Semi-Reboque 2S2	Semi-Reboque 3S2	Total
								
VDM(UN)	947	292	1	242	63	3	1	1549
Percentual	61,1	18,8	0,1	15,6	4,1	0,2	0,1	99,9

Fonte: Oliveira (2007)

Quadro 5 - Contagem de tráfego para a pista experimental CEASA-GO – Agosto de 2005

PERÍODO	V _t	N
6 Meses	278.820	9 x 10 ³
12 Meses	557.640	1,7x10 ⁴
18 Meses	836.460	2,6x10 ⁴
5 Anos	2.826.925	9 x 10 ⁴
10 Anos	5.635.850	2 x 10 ⁵

Fonte: Oliveira (2007)

Dessa forma, os dados das Tabelas 3 e 4 mostraram que apesar do alto volume de tráfego (VDM), o número N é baixo, pois a maior parte dos veículos que trafegam sobre a pista são veículos leves e em função de 95% dos caminhões trafegarem vazios. Ademais, a utilização dos fatores de equivalência de carga propostos pelo corpo de engenheiros dos Estados Unidos da América (USACE) para determinação da solicitação do pavimento em termos de número N não é ideal para a realidade brasileira, sendo necessário que sejam realizados estudos de dimensionamento de frota real de tráfego baseada no peso máximo por eixo estabelecido na lei da balança e em dados obtidos do monitoramento dos veículos que trafegam pelas rodovias do país a partir de órgãos rodoviários oficiais.

O autor Oliveira (2007) acompanhou a execução trecho e realizou os ensaios de laboratório para caracterização dos materiais, como a determinação de parâmetros de compactação e determinação do módulo de resiliência, além de realizar, em ensaios de campo, a determinação da deflexão através da Viga Benkelman e outros ensaios.

A Figura 17 ilustra a imagem de satélite derivado do software Google Earth para a localização atual da pista experimental da CEASA-GO.

Figura 17 - Ilustração geral da pista do CEASA-GO em imagem de satélite



Fonte: Marques (2012)

3 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizado um estudo abordando tópicos como a avaliação estrutural e funcional de pavimentos asfálticos, retroanálises de bacias de deflexão e estudo dos softwares, BackMeDiNa e MeDiNa, a serem utilizados na pesquisa.

Paralelamente, fez-se uma pesquisa de levantamentos deflectométricos realizados na pista experimental, objeto de estudo, a fim de se obter dados para a realização das retroanálises.

A partir dos dados de levantamentos deflectométricos realizados com o uso da viga Benkelman foi feita uma análise e tratamento dos dados, além do ajuste ou transformação, com base na literatura, das bacias de deformação para as bacias equivalentes às obtidas com o uso do equipamento *Falling Weight Deflectometer* - FWD, que são necessárias para realizar as retroanálises no software BackMeDiNa.

A retroanálise por meio do software BackMeDiNa, é iniciada a partir de um documento gerado pelo software – onde é possível inserir os valores da bacia, como os dados do carregamento aplicado – denominado “Modelo de arquivo de bacias”. Dessa forma, com base na proposta de Nery (2020), os dados foram inseridos a partir de uma planilha do Excel, no formato .csv, e foram preenchidos nas abas: o número da seção, o raio da placa de aplicação de carga do FWD, a data dos ensaios, a temperatura do ar e do pavimento, a carga (unidade em kgf), número da estaca e valores de deflexão, em “ μm ”.

A retroanálise no software BackMeDiNa utilizou a metodologia de Theisen *et al* (2009) e as correlações de Borges (2001) a fim de investigar a diferença dos resultados encontrados dos módulos resilientes das camadas. Dessa forma, para as correlações de Borges (2001), foi aplicada a Equação 2.7 a fim de encontrar novos valores de deflexão correlacionados entre a viga Benkelman e o FWD para a estrutura do pavimento estudado pelo autor.

A conversão do carregamento do eixo padrão - eixo simples de rodas duplas - ESRD é feita considerando o carregamento efetuado por apenas uma das rodas do semieixo; as deflexões são divididas por 2, além do uso da Equação 2.5 oriunda do método de Theisen *et al* (2009) para calcular as distâncias entre as deflexões.

A conversão da temperatura não foi realizada, pois tanto o carregamento quanto a temperatura são considerados valores iterativos de cálculo e não influenciam diretamente nos resultados, conforme Nery (2020).

Além disso, ainda consoante com Nery (2020), para a transformação dos dados de Viga Benkelman para FWD, as medidas de deflexão para o ponto (Do) devem ser inicialmente convertidas para se obter uma padronização conforme a Equação 2.5.

A inserção das camadas no BackMeDiNa, segundo o manual do DNIT, é feita após a importação do arquivo que contém os dados da bacia a ser estudada e as espessuras das camadas serão inseridas no software após realizar o procedimento de carregamento do arquivo .csv do programa Excel.

As colunas e linhas da planilha já estarão adequadas para leitura no programa após esse procedimento e os valores de rigidez e do coeficiente de Poisson serão adotados automaticamente pelo software BackMeDiNa.

Além disso, conforme os estudos de Camarini, Silva e Júnior e Fontenele (2019), os valores iniciais de módulo fornecidos pelo programa pouco interferem nos módulos finais. Portanto, poderá ser possível, consoante Bueno (2016), realizar a arbitragem de valores de módulo de resiliência para evitar a compensação modular de cada camada e adotar, após a retroanálise, o valor calculado pelo software BackMeDiNa.

A condição de aderência entre as camadas foi considerada, no software BackMeDiNa e MeDiNa, como “não-aderida”, ou seja, que as camadas atuam de forma independente. Após o preenchimento dos dados de entrada do programa, a etapa de cálculo se inicia e deverá ser repetida a fim de obter-se a melhor aproximação possível entre as deflexões medidas e calculadas.

De acordo com Nery (2020), os valores de correlação razoáveis para a retroanálise são aqueles situados entre a 5% e 10% para o erro quadrático médio (RMS) calculado pelo programa BackMeDiNa após retroanalisar as bacias de deflexão importadas.

O software MeDiNA, inicialmente, calcula o valor do número N e do fator de veículo (FV), em função do VMD ou do número N (1º ano de tráfego), então é importante completar as informações referentes à configuração de eixos para cada categoria de veículo que pode utilizar a pista em estudo do CEASA-GO.

Após realizar esse procedimento, ainda utilizando o software MeDiNa, as simulações, para avaliar a vida útil do pavimento e o seu desempenho, em termos de área trincada e flecha de deformação permanente, foram estimados a partir de dados dos materiais e tráfego, da construção da pista experimental, para verificar o quão prejudicial seria o fluxo ao longo do tempo na pista.

Além de realizar a análise, o tratamento dos dados das deflexões, a retroanálise das bacias de deflexão e o novo dimensionamento do pavimento asfáltico, foi realizado também, em campo, uma inspeção visual para verificar os defeitos existentes, como trincas, baseada nas recomendações da norma DNER 005/2003 - Avaliação Funcional de Pavimentos Asfálticos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A pista experimental da CEASA-GO foi pavimentada no final do ano de 2003 e os ensaios com a Viga Benkelman sobre a superfície do pavimento foram realizados no início do ano de 2004.

De acordo com Oliveira (2007), foram levantadas mais de 40 bacias desde o início da construção das camadas estruturais do pavimento até a execução final da camada de rolamento para a averiguar as deflexões do pavimento. O Apêndice A deste trabalho apresenta as medidas de deflexão lidas para o ensaio de Viga Benkelman na época de construção da pista.

As retroanálises consistiram, primeiramente, em analisar os dados dos ensaios de Viga Benkelman realizados por Oliveira (2003) referente à época de construção do trecho experimental da pista do CEASA-GO, entre os anos de 2003 e 2004.

O início da retroanálise consistiu em transformar as distâncias de leitura da Viga Benkelman tradicional ($D_0, D_{25}, D_{50} \dots D_{200}$) para as distâncias que seriam aproximadas para o ensaio de FWD.

Um exemplo de cálculo para a transformação de distâncias, a partir da Equação 2.5, é evidenciado abaixo convertendo a distância de 0 na Viga para 20 no FWD resultando, assim, em D15 na transformação de Theisen *et al* (2009):

$$Xi = [(xi)^2 + (0,5dcg)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Equação 2.5})$$

$$Xi = [(0)^2 + (15)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$Xi = D0 (VB) = D0 (FWD) = D15 (RETROANÁLISE)$$

Portanto, a nova distância calculada equivalente a D_0 na Viga Benkelman e D_0 no FWD será de D_{15} e a sua respectiva deflexão será dividida por 2. Esse procedimento de cálculo foi realizado para as demais distâncias de leitura da ponta de prova da viga Benkelman.

O Quadro 6 mostra os valores encontrados para as novas distâncias de leitura das deflexões calculadas com a Equação 2.5.

Quadro 6 - - Distâncias convertidas da Viga Benkelman para FWD

DISTÂNCIA CALCULADA FWD	D0	D25	D50	D75	D100	D125	D150	D175	D200	VB
	0	20	30	45	60	90	120	150	180	FWD
	15	25	34	47	62	91	121	151	181	Novas Distâncias Calculadas
RAIO FWD p/ 1 carga (cm)	15									

Fonte: autoria própria (2021)

Dessa forma, a partir das distâncias recalculadas com o método de Theisen *et al* (2009), realizou-se a conversão da unidade das deflexões lidas com a VB de centésimos de milímetro (0,01 mm) para micrômetros (μm), além das deflexões terem sido divididas por dois.

O Quadro 7 mostra os valores de deflexão dividido por dois para cada estaca ensaiada na pista com a Viga Benkelman sobre a superfície da camada de rolamento asfáltica e, assim, com a estrutura completa do pavimento pronta para uso. A unidade de referência já está em micrômetros (μm).

Quadro 7 - Deflexões em micrômetros sobre o revestimento da pista CEASA-GO método Theisen *et al* (2009)

ESTACAS	DEFLEXÕES DA PISTA EXPERIMENTAL CEASA-GO JAN/2004 (CONSTRUÇÃO)								
	D15	D25	D34	D47	D62	D91	D121	D151	D181
2+15 BE	230	140	80	40	1	1	1	1	1
3 BD	180	80	30	20	10	10	10	1	1
3+5 BE	180	90	30	10	1	1	1	1	1
3+10 BD	270	180	100	70	40	20	10	1	1
3+15 BE	210	110	70	40	20	20	10	1	1
4 BD	310	210	130	60	40	20	10	1	1
4+5 BE	250	160	70	50	20	20	10	1	1
4+10 BD	270	200	110	60	30	20	10	1	1

Fonte: autoria própria (2021)

Os valores de deflexão iguais a 1, apresentados na Figura 19, foram colocados para substituir os valores iguais a 0, porque o software BackMeDiNa não consegue realizar a retroanálise, através do método iterativo de aproximação, em resultados de deflexão nulos.

Na configuração do modelo de bacias considerou-se as deflexões até a distância convertida de d121, pois, a partir de d121, as deflexões da viga lidas eram, conforme a Figura 19, constantes e iguais a 1, então, interpretou-se conforme os dados apresentados por Nery (2020) que o software BackMeDiNa não consegue retroanalisar adequadamente quando possui deflexões constantes, pois o programa utiliza um modelo de regressão linear para o método iterativo de cálculo.

Outrossim, não se optou por considerar a retroanálise camada por camada da estrutura do pavimento, pois, segundo manual do MeDiNa, o BackMeDiNa é um software auxiliar que busca correlacionar as deflexões e realizar métodos iterativos a fim de aproximar as deflexões em função da estrutura completa do pavimento, composta pelo subleito, sub-base ou base e camada asfáltica.

Antes de importar-se os dados para o software BackMeDiNa fez-se necessário imputar os valores da planilha ilustrada na Figura 20, a partir da planilha padrão de Modelo de Bacias fornecida pelo próprio software em formato “.csv”.

Na Figura 20, é possível verificar que a carga indicada é igual a metade da metade carga do eixo padrão, aplicada somente por um dos pneus do semi-eixo. Além disso, os valores de deflexão estão convertidos para micrômetros, o raio de aplicação em cm e as distâncias convertidas para o carregamento aplicado conforme cálculos através da Equação 2.5 proposta por Theisen *et al* (2009).

Figura 18 - Planilha padrão para imputar os dados no software

[illegible]

Fonte: autoria própria (2021)

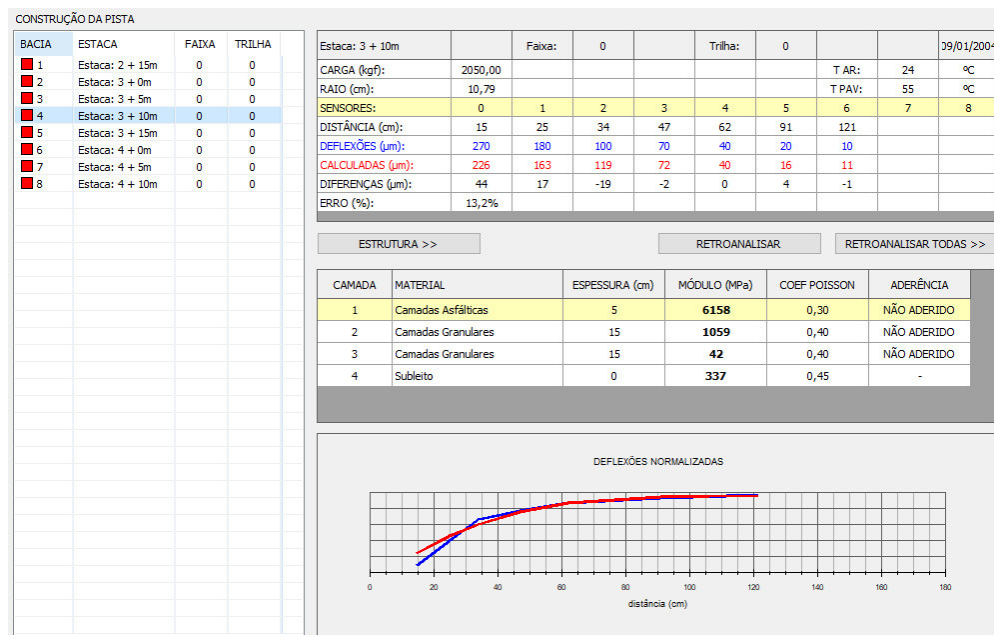
O cálculo do raio foi realizado, conforme Medina e Motta (2015), através da relação da carga do eixo e da área de contato entre os pneus encontrando, assim, o raio de 10,79 cm. Além disso, no manual do MeDiNa, os autores trouxeram o valor de 10,79 cm para o raio e valores de 0,56 MPa para a pressão dos pneus do eixo-padrão (8,2tf).

Ademais, é importante salientar que o valor da carga de 2050kgf é proveniente, a partir da metodologia de Theisen (2009), por considerar apenas uma das rodas do semi-eixo (4,1tf) do eixo-padrão (8,2tf), ou seja, o valor da carga é metade do valor da carga no semi-eixo.

A Figura 21 ilustra a interface do software já configurada para realizar os cálculos do método iterativo para a estrutura do pavimento da pista experimental da CEASA-GO contendo a estrutura de camada asfáltica CBUQ, Sub-base e Base com as respectivas espessuras em cm, de 5, 15 e 15, além das condições de aderência para cada uma das camadas que foi adotado como “não aderido”, seguindo as instruções do Manual do MeDiNa.

Além disso, é possível verificar, no gráfico de deflexões normalizadas, que a curva em vermelho é a calculada e aquela em azul é as deflexões imputadas pela planilha de modelos padrão apresentada na Figura 19.

Figura 19 -- Interface do BackMeDiNa para a retroanálise da pista experimental da CEASA GO



Fonte: autoria própria (2021)

Os resultados para cada uma das bacias retroanalisadas, bem como o resultado em vermelho e classificados, segundo o manual do MeDiNa, como aqueles que não obtiveram resultados satisfatórios na retroanálise estão na Tabela 6 que ilustra os módulos encontrados para cada bacia de deflexão a partir do método de Theisen *et al* (2009).

Além disso, no Quadro 8, os valores de cor vermelha ficaram muito além dos módulos encontrados nas literaturas e, assim, foram retirados da média dos valores módulos de resiliência encontrados para Oliveira (2007) e Guabiroba (2020).

Quadro 8 - Ilustração dos resultados do BackMeDiNa para as bacias retroanalisadas do método Theisen

MR - BACKMEDINA - MÉTODO THEISEN				
ESTACAS	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
2+15 BE	3173	420	65	2649
3 BD	1618	183	259	610
3+5 BE	1633	628	90	3209
3+10 BD	6158	1059	42	337
3+15 BE	814	441	117	374
4 BD	677	749	38	333
4+5 BE	3024	278	89	363
4+10 BD	2689	588	47	340
MÉDIA MR (MPa)	3049	382	139	349

Fonte: autoria própria (2021)

Portanto, a média dos valores, respectivamente, para o Revestimento, Base, Sub-base e Subleito foram de 3049 MPa, 382 MPa, 139 MPa e 349 MPa, conforme Tabela 6.

Os valores de módulos resilientes encontrados por Oliveira (2007), em laboratório, através do ensaio triaxial dinâmico foram os seguintes: mínimo de 128 e o máximo de 369 MPa para a camada de base e de 146 a 368 MPa para a camada de sub-base. O valor do módulo resiliente do subleito determinado pelo autor citado apresentou uma faixa de variação de 165 a 270 MPa.

Observando os valores apresentados na Tabela 6, verifica-se que eles apresentaram uma certa dispersão, quando comparados com os módulos de laboratório de Oliveira (2007), porém os valores, que não foram descartados, se aproximaram ou até ultrapassam os valores de laboratório para algumas camadas e isso é devido a consideração do software pela variabilidade das deflexões e configurações de carga.

Cabe salientar que módulos de resiliência de materiais granulares são mais influenciados pela variação da tensão confinante e que módulos de resiliência de materiais coesivos tem maior influência da tensão de desvio, que é a diferença entre a tensão principal maior e a tensão confinante.

Uma referência regional para valores de módulo de resiliência de camadas asfálticas são os estudos realizados por Guabiroba (2020). No referido trabalho, o material que mais aproxima do revestimento asfáltico da pista experimental da CEASA é o Micaxisto Faixa C Superpave que apresentou um valor de módulo de resiliência igual a 7658 MPa. O valor médio encontrado nas retroanálises foi igual a 3049 Mpa. Apesar de muito menor, o valor está de acordo com os módulos encontrados por Nery (2020), dentro da faixa entre 3000 a 10.000 MPa.

Além das retroanálises feitas utilizando a metodologia proposta por Theisen (2009), também foram realizadas retroanálises utilizando uma das correlações definidas por Borges (2001), a partir de deflexões lidas pela Viga Benkelman (VB) e pelo FWD.

A correlação entre os valores de deflexão da viga Benkelman com o FWD foi obtida por meio de uma regressão linear do tipo $y = a \times x + b$. O autor verificou que o coeficiente linear da equação (b) exerce pouca influência nos cálculos e sugeriu desconsiderá-lo. A Equação 2.12, definida por Borges (2001) apresenta a correlação que melhor se adequa aos revestimentos asfálticos com 5cm de espessura e camadas granulares e por isso foi utilizada neste trabalho.

$$Dvb = 1,193 * Dfwd \quad (\text{Equação 2.12})$$

Entretanto, as distâncias consideradas diferem-se daquelas propostas no método de Theisen *et al* (2009), pois optou-se por considerar as distâncias do ensaio da Viga Benkelman (VB), como D_0 e D_{25} e assim por diante, a fim de obter uma melhor convergência de resultado dos módulos entre o BackMeDiNa e a correlação proposta.

Os valores encontrados das novas deflexões utilizando a correlação estabelecida por Borges (2001) estão apresentadas na planilha modelo para importar e retroanalisar no BackMeDiNa, ilustrados pela Figura 22, e também se buscou ocultar os valores constantes das deflexões, conforme explicado anteriormente.

Figura 20 - Valores das deflexões correlacionadas de acordo com Borges (2001)

BACKMEDINA																
SEÇÃO:	CONSTRUÇÃO DA PISTA															
RAIO (cm):	10,79															
Data de Execução	Temp. Do	Temp. Do	Carga	Estaca – N	Estaca – D	Estaca – F	Estaca – T	d0	d25	d50	d75	d100	d125	d150		
09/01/2004	24	55	4100	2	15	0	0	386	235	134	67	34	17	1		
09/01/2004	24	55	4100	3	0	0	0	302	134	50	34	17	17	17		
09/01/2004	24	55	4100	3	5	0	0	302	151	50	17	1	1	1		
09/01/2004	24	55	4100	3	10	0	0	453	302	168	117	67	34	17		
09/01/2004	24	55	4100	3	15	0	0	352	184	117	67	34	34	17		
09/01/2004	24	55	4100	4	0	0	0	520	352	218	101	67	34	17		
09/01/2004	24	55	4100	4	5	0	0	419	268	117	84	34	34	17		
09/01/2004	24	55	4100	4	10	0	0	453	335	184	101	50	34	17		

Fonte: autoria própria (2021)

Um detalhe interessante na Figura 22 é que a carga considerada foi a metade da carga do eixo-padrão (8200kgf) a fim de melhor aproximar esses valores da carga uniaxial do prato de aplicação do FWD devido aplicação de um pneu, mas o raio considerado foi o de 10,79 cm, conforme manual do MeDiNa para o eixo-padrão.

Ademais, o uso das distâncias do ensaio de VB, para as leituras de deflexão, é devido ao método de Borges (2001) ser anterior ao de Theisen *et al* (2009) e a Equação 2.12 correlacionar diretamente os dois ensaios: FWD e VB.

A Figura 23 apresenta a interface do programa BackMeDiNa com a configuração do raio, da carga.

Figura 21 - Interface do BackMeDiNa para os dados de deflexão por Borges (2001)

CONSTRUÇÃO DA PISTA

BACIA	ESTACA	FAIXA	TRILHA
1	Estaca: 2 + 15m	0	0
2	Estaca: 3 + 0m	0	0
3	Estaca: 3 + 5m	0	0
4	Estaca: 3 + 10m	0	0
5	Estaca: 3 + 15m	0	0
6	Estaca: 4 + 0m	0	0
7	Estaca: 4 + 5m	0	0
8	Estaca: 4 + 10m	0	0

Estaca: 3 + 0m	Faixa: 0	Trilha: 0	09/01/2004						
CARGA (kgf):	4100,00		T AR: 24 °C						
RAIO (cm):	10,79		T PAV: 55 °C						
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	25	50	75	100	125	150		
DEFLEXÕES (µm):	302	134	50	34	17	17			
CALCULADAS (µm):	302	133	53	29	21	17	14		
DIFERENÇAS (µm):	0	1	-3	5	-4	0	3		
ERRO (%):	12,6%								

ESTRUTURA >> RETROANALISAR RETROANALISAR TODAS >>>

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	5	4549	0,30	NÃO ADERIDO
2	Camadas Granulares	15	1666	0,40	NÃO ADERIDO
3	Camadas Granulares	15	280	0,40	NÃO ADERIDO
4	Subleito	0	494	0,45	-

DEFLEXÕES NORMALIZADAS

distância (cm)

Fonte: autoria própria (2021)

O Quadro 9 apresenta os valores de módulo de resiliência para cada bacia da retroanálise e camadas do pavimento asfáltico utilizando a correlação propostas por Borges (2001):

Quadro 9 - Módulos de Resiliência da retroanálise para Borges (2001)

MR - BACKMEDINA - MÉTODO BORGES (2001)				
ESTACAS	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
2+15 BE	8743	7509	15	8280
3 BD	4549	1666	280	494
3+5 BE	81576	396	71	2891
3+10 BD	2480	6614	15	448
3+15 BE	22700	4207	58	338
4 BD	4120	4255	16	348
4+5 BE	754	4394	41	338
4+10 BD	4703	4233	20	339
MÉDIA MR (MPa)	4919	396	280	384

Fonte: autoria própria (2021)

Quando observa-se as médias obtidas dos resultados apresentados nas Tabelas 6 e 7, para as retroanálises utilizando Theisen *et al* (2009) e Borges (2001), verifica-se que os resultados estão divergentes e isso se deve ao fato de que as metodologias são muito distintas entre si, pois a primeira considera a conversão das distâncias, em função do semi-eixo da carga dos pneus, e a segunda utiliza as distâncias originais da Viga Benkelman, mas com metade da carga do eixo padrão para aproximar da carga uniaxial do FWD.

Isso demonstra que a correlação entre os dois tipos de ensaio não é simples de ser realizada, tanto pela divergência de módulos encontrados, quanto pela distribuição das deflexões nas distâncias às quais são calculadas pelos equipamentos.

Ademais, Medina et al (1994) apresentaram exemplos que ilustram a dificuldade de correlação entre os ensaios de FWD e a Viga Benkelman e concluem que, em geral, não existe singularidade nas correlações entre deflexões obtidas por diferentes aparelhos e que devem ser utilizadas com compreensão e consciência dos erros envolvidos, além de serem dependentes das estruturas ensaiadas, das condições climáticas, modo de carregamento e metodologia empregada.

4.1 DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O MeDiNa

Um novo dimensionamento do pavimento da pista experimental utilizando o MeDiNa, método mecanístico-empírico, foi realizado adotando-se valores módulo de resiliência -MR das camadas obtidos de forma experimental por Oliveira (2007) e Guabiroba (2020). Os valores de MR adotados para as camadas de subleito, sub-base, base e revestimento foram de, respectivamente, 270 MPa, 368MPa, 369 MPa e 7658 MPa.

Entretanto, antes de dimensionar o pavimento, é importante, no software MeDiNa, configurar os materiais para melhor aproximá-los daqueles utilizados na construção da pista experimental da CEASA GO.

A Figura 24 ilustra a página do programa configurada para o revestimento asfáltico denominado Concreto Asfáltico CEASA com o módulo de 7658 MPa, obtido de Guabiroba (2020), para o material Micaxisto Faixa C Superpave.

Figura 22 - - Tela de configuração do MeDiNa para o material de concreto asfáltico da pista experimental

Propriedades da Camada 1

BASE DE DADOS	
Projeto	
Classe 1	
Classe 2	
Classe 3	
Classe 4	
RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	
RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	
RJ CAP 30/45 #19,1mm Sepetiba	
RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	
Concreto Asfáltico CEASA	

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	Concreto Asfáltico CEASA
Parâmetros	
Espessura (cm)	5,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	7658
Características	
Tipo de CAP	CAP 50/70
Massa específica (g/cm³)	2,4
Resistência à tração (MPa)	2,04
Teor de asfalto (%)	5,4
Volume de vazios (%)	5,0
Faixa Granulométrica	#19,1mm
Abrasão Los Angeles (%)	36
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Curva de Fadiga	
Modelo:	k1 .(et . ⁿ k2)
Coefficiente de Regressão (k1):	3,0e-11
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,426
Classe de Fadiga:	3
FFM (100µ a 250µ):	0,99

Excluir Atualizar Salvar OK Cancel

Fonte: autoria própria (2021)

Os valores de fadiga para o revestimento asfáltico, foram estimados de acordo com o material padrão do software que mais se aproximou do material utilizado na pista experimental, o RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba. Os valores de fadiga (k1 e k2), decorrentes do ensaio do módulo de resiliência, foram adicionados na aba do tipo de “Modelo Constituinte –Resiliente não linear”.

A caracterização dos materiais de base e sub-base, no software MeDiNa, estão explícitas nas Figuras 25 e 26 e, assim, é possível verificar algumas informações importantes para o programa como massa específica, módulo, dados de compactação e outros conforme as Figuras abaixo.

Os valores para os parâmetros de resiliência k_1 , k_2 , k_3 e k_4 foram utilizados dos dados de laboratório de Oliveira (2007), na aba de “Modelo Constituinte – Resiliente não linear”, do programa MeDiNa. Além disso, os valores para os coeficientes de regressão, para o ensaio de deformação permanente, foram os mesmos do material padrão denominado “Brita Graduada – Gnaiss C7”, pois Oliveira (2007) não realizou esse ensaio na pista experimental.

Figura 23 - Tela de configuração do MeDiNa para o material de base da pista experimental

Propriedades da Camada 2

BASE DE DADOS	
Projeto	
Brita Graduada - Gnaiss C1	
Brita Graduada - Gnaiss C2	
Brita Graduada - Gnaiss C3	
Brita Graduada - Gnaiss C4	
Brita Graduada - Gnaiss C5	
Brita Graduada - Gnaiss C6	
Brita Graduada - Gnaiss C7	
Solo Brita - M3 (LG' s: 1521)	
Solo Brita - M4 (NG' s: 1494)	
Solo Brita - M5 (LG' s: 1521)	
RCD - BASE	
RCD - SUB-BASE	

MATERIAL GRANULAR	
Material	RCD - BASE
Parâmetros	
Espessura (cm)	15,0
Coefficiente de Poisson	0,40
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Não Linear
Coefficiente de Regressão (k1):	758,12
Coefficiente de Regressão (k2):	0,411
Coefficiente de Regressão (k3):	0,000
Coefficiente de Regressão (k4):	0,000
Características	
Descrição do Material	87% RCD e 17% Solo Argiloso
Massa específica (g/cm³)	1,8
Umidade Ótima (%)	14,5
Energia Compactação	Intermediária
Abrasão Los Angeles (%)	36
Faixa Granulométrica	19,1mm
Norma ou Especificação	DNIT ES 141
Deformação Permanente	
Modelo:	$ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$
Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1):	0,0775
Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2):	-0,2304
Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3):	1,1428
Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4):	0,0857

Excluir Atualizar Salvar OK Cancel

Fonte: autoria própria (2021)

A Figura 28 apresenta os parâmetros usuais de configuração, no MeDiNa, para o tráfego, como o número N, os valores de VDM e o tipo de via. Porém, o software calcula automaticamente o número N para o VDM, ou vice-versa, quando colocado algum valor na aba correspondente de N ou VDM, mas buscou-se utilizar, neste trabalho, o valor de VDM de 1549 por ano, proveniente dos estudos de Oliveira (2007), em agosto de 2005.

A configuração aproximada do valor do fator de veículo (FV) foi feita baseada na distribuição de veículos, segundo a contagem de veículos de Oliveira (2007), e o valor do número N para o período de projeto de 10 anos que foi igual a $2 \cdot 10^5$. A via da pista experimental é classificada como Sistema Local, com confiabilidade pré-configurada do software MeDiNa, de 65%.

Figura 26 - Dados do tráfego para o cálculo do número N

+ EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
- DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Local
VMD (1º ano):	1549
FV:	0,034
N anual (1º ano):	1,92e+04
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	1,92e+04
Taxa de crescimento (%):	1,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	2,01e+05

Fonte: autoria própria (2021)

A Figura 29 apresenta a interface geral do programa configurada segundo as configurações anteriormente citadas e as Figuras 30, 31 e 32 ilustram os resultados encontrados, como a evolução dos danos da AT e afundamento da trilha de roda, para os dados imputados da pista de Oliveira (2007) e Guabiroba (2020), a cada 6 meses, no período de 10 anos, de acordo com o cálculo do número N igual a $2 \cdot 10^5$.

Os valores calculados dos afundamentos de trilha de roda para cada camada também são mostrados no programa a fim do projetista verificar qual foi a camada que mais sofreu danos ao longo de 10 anos.

Figura 27 - Tela de interface geral do MeDiNa (resiliente não linear)

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: gabriel.novato EMPRESA: IFG

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc. MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Concreto Asfáltico CEASA	5,0	7658	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	RCD - BASE	15,0	Resiliente Não Linear	0,40
3	MATERIAL GRANULAR	RCD - SUB-BASE	15,0	Resiliente Não Linear	0,40
SL	SUBLEITO	SOLO LG - ARGILOSO LATERÍTICO	0,0	270	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Local

VMD (1º ano): 1549

FV: 0,034

N anual (1º ano): 1,92e+04

% Veículos na faixa de projeto: 100

N Anual da faixa: 1,92e+04

Taxa de crescimento (%): 1,0

Período de projeto (anos): 10

N Total: 2,01e+05

FV:
Fator de veículo no ano de abertura do tráfego

Fonte: autoria própria (2021)

Figura 28 - Tela de resultado geral do MeDiNa (resiliente não linear)

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para gabriel.novato (gabrielnovato@gmail.com), da empresa IFG.

Dimensionamento do pavimento

Empresa: IFG
Nome do Projeto:
Responsável pelo projeto: gabriel.novato

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

Tipo de via: Sistema Local
Nível de confiabilidade: 65%
Período de projeto: 10 anos.

Análise realizada em 01/12/2021 às 18:07:44 no modo: Pavimento Novo (Nível A)
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 1,1%
Análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada.
Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: 3,9mm

Fonte: autoria própria (2021)

Os resultados encontrados foram: área trincada de 1,1% e afundamento da trilha de roda de 3,9mm. Entretanto, vale frisar que esses resultados levaram em consideração os dados de Oliveira (2007) e Guabiroba (2020) e análise das camadas de base e sub-base como resiliente não linear.

Figura 29 - Evolução dos danos do pavimento para o tempo estimado de 10 anos (resiliente não linear)

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	1,595e+03	0,16%	3,0
6	9,588e+03	0,30%	3,3
12	1,922e+04	0,39%	3,4
18	2,891e+04	0,46%	3,5
24	3,864e+04	0,51%	3,6
30	4,842e+04	0,56%	3,6
36	5,825e+04	0,61%	3,7
42	6,813e+04	0,65%	3,7
48	7,805e+04	0,69%	3,7
54	8,803e+04	0,73%	3,8
60	9,806e+04	0,77%	3,8
66	1,081e+05	0,81%	3,8
72	1,183e+05	0,84%	3,8
78	1,284e+05	0,88%	3,8
84	1,387e+05	0,91%	3,9
90	1,489e+05	0,94%	3,9
96	1,593e+05	0,98%	3,9
102	1,697e+05	1,01%	3,9
108	1,801e+05	1,04%	3,9
114	1,906e+05	1,07%	3,9
120	2,011e+05	1,11%	3,9

Fonte: autoria própria (2021)

Figura 30 - Afundamento de trilha de roda para cada camada (resiliente não linear)

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	0,89
3	MATERIAL GRANULAR	0,82
4	SUBLEITO	2,23
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		3,9

Fonte: autoria própria (2021)

Também foi realizado o dimensionamento do pavimento, no MeDiNa, para os valores de módulo de resiliência de Oliveira (2007), a fim de comparar os resultados encontrados para a área trincada e afundamento de trilha de roda do modelo constituinte resiliente não linear e para valores de módulo para cada camada na época de construção da pista da CESA-GO. A configuração das camadas foi a mesma para as camadas do revestimento, base, sub-base e subleito adotando somente o valor do módulo de resiliência e desprezando, assim, os valores dos parâmetros de resiliência.

A Figura 33 apresenta a interface geral configurada do programa com os módulos resilientes (MR) da época de construção da pista experimental para o modelo constituinte de resiliente linear.

Figura 31 - Tela de interface geral do MeDiNa – Modelo Resiliente Linear

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: gabriel.novato EMPRESA: IFG

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc. MODOS: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Concreto Asfáltico CEASA	5,0	7658	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	RCD - BASE	15,0	348	0,40
3	MATERIAL GRANULAR	RCD - SUB-BASE	15,0	329	0,40
SL	SUBLEITO	SOLO LG - ARGILOSO LATERÍTICO	0,0	270	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Local

VMD (1º ano): 1549

FV: 0.034

N anual (1º ano): 1.92e+04

% Veículos na faixa de projeto: 100

N Anual da faixa: 1.92e+04

Taxa de crescimento (%): 1.0

Período de projeto (anos): 10

N Total: 2.01e+05

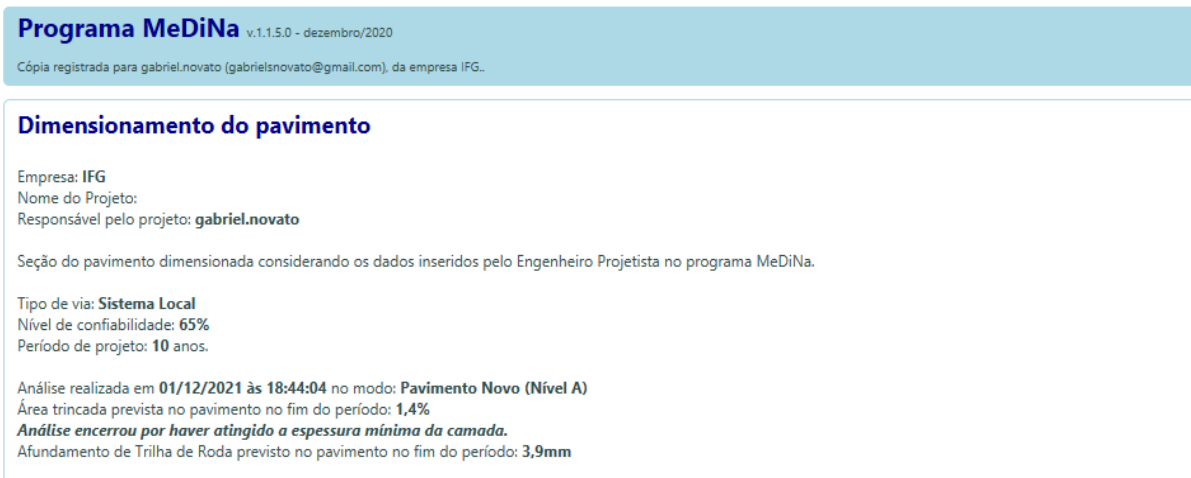
Taxa de crescimento (%):

Taxa de crescimento do tráfego

Fonte: autoria própria (2021)

A seguir, a Figura 34 ilustra os resultados gerais do MeDiNa para o Modelo Resiliente Linear e os valores para AT e afundamento de trilha de roda foram, respectivamente, 1,4% e 3,9mm.

Figura 32 Resultados gerais do MeDiNa - Modelo Resiliente Linear



Fonte: autoria própria (2021)

Os valores de afundamento da trilha de roda e de área trincada encontrados, respectivamente, de acordo com o Modelo Resiliente Linear, foram de 3,9 mm e 1,4%, no período de 10 anos.

Comparando os dois resultados, os valores obtidos pela configuração de modelo constituinte (resiliente linear) aumentou, em termos de área trincada, quando comparado ao modelo de resiliente não linear. O afundamento de área trincada ficou igual para duas análises devido ser os mesmos parâmetros de deformação permanente utilizado nas camadas.

Esse aumento da correlação da área trincada, segundo os resultados da análise resiliente linear, diz respeito ao tipo de cálculo que o software realiza para estimar a área trincada ao longo dos anos, porque o programa leva em consideração o módulo de resiliência constante para as camadas e não faz o cálculo pela variação proveniente dos parâmetros resiliência. Além disso, o programa encerrou as análises por ter calculado até o dimensionamento mínimo da camada de revestimento asfáltico que é de 5cm.

A estimativa de área trincada para a pista experimental, nas duas análises, está coerente com análise de tráfego estimada por Oliveira (2007), em agosto 2005, pois a maioria dos caminhões, cerca de 95%, trafegavam descarregados na via local, então os esforços solicitantes previstos eram baixos para o prazo de 10 anos.

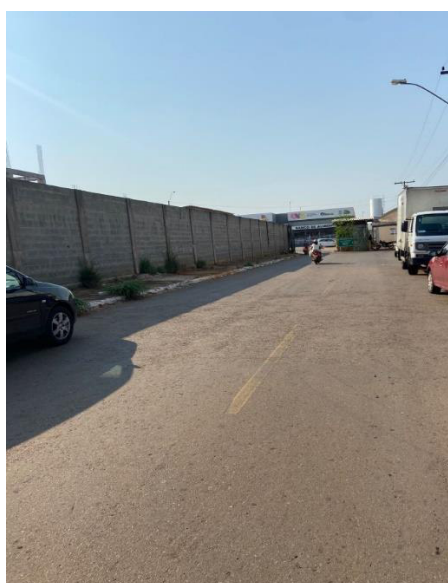
Além disso, foi possível perceber que os valores dos módulos de resiliência, os dados de tráfego – principalmente o VDM – e as configurações dos materiais utilizados na pista influenciam diretamente no cálculo da área trincada e afundamento de trilha de roda, portanto, é necessário que o projetista tenha esses dados muito bem calibrados.

Também se verifica que os valores do afundamento de trilha de roda estão diretamente ligados aos valores dos coeficientes de regressão (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) e, assim, esses valores devem estar 100% confiáveis para cada camada configurada a fim de não ter valores irreais para o pavimento que está sendo estudado.

4.3 AVALIAÇÃO FUNCIONAL DA PISTA EXPERIMENTAL

A inspeção visual foi realizada no dia 06/10/2021 para verificar qual seria o real estado, em termos de trincas e fissuras, da pista experimental devido há mais de 10 anos de existência. A Figura 35 mostra o panorama geral da pista experimental da CEASA-GO.

Figura 33 - Visão geral da pista experimental



Fonte: autoria própria (2021)

A pista, em geral, encontra-se em boa conservação e isso se deve ao bom desempenho do pavimento associado ao baixo fluxo de caminhões carregados, pois a expectativa, quando foi concebida a pista experimental, era que o local seria uma via onde entrariam e sairiam muitos veículos carregados, porém a administração da CEASA-GO redefiniu a forma de acesso na época da construção. Entretanto, na Figura 36, é possível verificar

Figura 34 - Trincas e fissuras na pista experimental



Fonte: autoria própria (2021)

A via, nos dias atuais, é utilizada para a entrada e saída de veículos leves, como caminhonetes e carros de passeio, além de caminhões vazios e alguns carregados. A classificação das trincas observadas, conforme a norma (Brasil, 2003a) é de TTC e TLL para as trincas transversais isoladas curtas e trincas longitudinais isoladas longas, pois estão relacionadas à fadiga do revestimento e deformação permanente e a classe das fendas (FC-2) para trincas com abertura superior a 1,0mm e sem erosão nas bordas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os erros RMS tanto para o método de Theisen *et al* (2009), quanto para as correlações de Borges (2001), ficaram, em sua maioria, maiores do que 10% o que torna os resultados da retroanálise não favoráveis, de acordo com o Manual do MeDiNa. Entretanto, o ajuste de bacias, conforme os métodos dos autores supracitados, foi coerente para alguns valores de módulo encontrado pelo BackMeDiNa, pois foi possível verificar que a maioria desses módulos estavam adequados quando comparados com aqueles encontrados por Oliveira (2007) e Guabiroba (2020).

O método de Theisen *et al* (2009) utilizado neste trabalho encontrou valores médios de módulo resiliente para as camadas próximos daqueles obtidos pela correlação de Borges (2001). No entanto, é importante salientar que os valores de deflexão de viga Benkelman ajustados para o FWD dependem muito dos materiais e estrutura do pavimento na região onde está inserido.

Embora os valores das deflexões para realizar a retroanálise utilizando o software BackMeDiNa tenham sido estabelecidas a partir do ensaio de FWD, em função da maior sensibilidade para obtenção das leituras pelos sensores, atualmente, o alto custo do ensaio FWD não corrobora para que o uso do BackMeDiNa seja recorrente no dia a dia dos projetistas, entretanto existe a necessidade de melhor projetar os pavimentos, de acordo com as suas características e tráfego, que justificam o custo do ensaio FWD para mitigar as manutenções corretivas ao longo da vida útil do pavimento.

O dimensionamento do pavimento, por meio do software MeDiNa, foi influenciado diretamente pela configuração dos materiais que leva em conta os resultados de ensaios mais sofisticados, como o triaxial dinâmico, o valor do módulo resiliente das camadas feitas por Oliveira (2007) e Guabiroba (2020) e o estudo de tráfego da pista experimental. Dessa forma, o resultado encontrado para a área trincada e a deformação permanente estão coerentes com a inspeção visual de defeitos da pista, pois, de fato, o baixo fluxo de veículos associado ao bom desempenho dos materiais reciclados, nas camadas de base e sub-base, justifica o bom estado de conservação do pavimento.

Para realizar o novo dimensionamento do pavimento, utilizando o software MeDiNa, não foi feita a importação dos módulos, provenientes das retroanálises, devido a condição não satisfatória em termos de erro RMS, segundo o manual do MeDiNa. Então, optou-se por realizar o novo dimensionamento aplicando os dados dos materiais das camadas e os módulos de laboratório da época de construção da pista experimental.

O resultado do dimensionamento utilizando o MeDiNa indicou resultados satisfatórios para o período de projeto analisado em termos de área trincada e afundamento de trilha de roda, embora não tenham sido inseridos os dados reais para os parâmetros de fadiga e deformação permanente para os materiais das camadas e revestimento asfáltico.

A seguir, como sugestões para pesquisas futuras decorrentes da realização do presente trabalho a fim de incrementar maiores resultados ao método mecanístico-empírico para a pista experimental estudada, é possível:

Realizar ensaios de campo com o uso do FWD e da viga Benkelman na pista experimental da CEASA e em outros pavimentos regionais a fim de criar novas correlações próprias para os materiais e estruturas de pavimentos típicas do estado de Goiás.

Realizar novas retroanálises dos dados de deflexões da Viga Benkelman a partir dos ensaios feitos na pista experimental, nos anos seguintes à construção, com o intuito de testar novas correlações entre a viga e FWD para verificar a evolução das deflexões ao longo dos anos.

Realização do ensaio de FWD, retroanálise dos dados de deflexão do ensaio e um novo estudo de tráfego na pista experimental a fim de verificar a real compatibilidade dos defeitos visualizados na inspeção visual do pavimento e o dimensionamento utilizando o software MeDiNa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724: Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação**. Rio de Janeiro, 2011.

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO Guide for design of pavement structures**. Washington, 1993.

ADLINGE, S. S.; GUPTA, A. K. **Pavement Deterioration and its Causes**. Índia, 2013. Disponível em: <[http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete\(civil\)volume6/60.pdf](http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete(civil)volume6/60.pdf)>. ISSN: 2278-1684. Acesso em 25/09/2019.

AGUIAR, Fred Digiacomio. **Avaliação funcional e estrutural do pavimento flexível no segmento monitorado de Itapoá**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2017.

ALBERNAZ, C. A. V. **Método Simplificado de Retroanálise de Módulos de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a Partir da Bacia de Deflexão**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, 1997.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás, ABEDA, 2010.

BORGES, Clarissa Beatriz Sandoval. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

BUENO, L. D. **Avaliação Deflectométrica e de Rigidez: Estudo de Caso em Três Trechos Monitorados em Santa Maria/RS**. Dissertação de Mestrado, UFSM. Santa Maria, RS, 2016.

CAMARINI, Guilherme Crepaldi; SILVA JUNIOR, Carlos Alberto Prado da; FONTENELE, Heliana Barbosa. **Avaliação de bacias de deflexões retroanalizadas pelo programa BackMeDiNa (2018)**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. Disponível em: <<http://www.anpet.org.br/anais/?=Dimensionamento,%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimentos%20I>>. Acesso em: 04 jul. 2021.

CARDOSO, S.H. **Faixas de módulos dinâmicos (Elásticos) obtidos por retroanálises durante sete anos**. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, MT, out. 1999.

CARDOSO, S. H. “**Avaliação estrutural não-destrutiva de pavimentos de aeroportos – a experiência brasileira**”. Seminário de Manutenção de Aeroportos – OACI, DIRENG, INFRAERO. São Paulo, SP, 1992.

CORREA, Ana Marta Sales; SANTOS, Gabriel Luís dos. **Estudo comparativo de análise de deflexões obtido a Viga Benkelman e FWD (FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER)**. Universidade do Vale do Paraíba, 2016.

CAMPOS, O.S., GUIMARÃES, S. R. R., E RODRIGUES, R.M. **Avaliação Estrutural dos Pavimentos da Rodovia Governador Carvalho Pinto**. Cuiabá, 1995.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-PRO 010/79: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: Procedimento - A**. Rio de Janeiro, 1979. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/DNER_PRO_010_79.pdf. Acesso em: 15 jun. 2021.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 024/94: Pavimento - determinação das deflexões pela viga Benkelman: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me024-94.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-PRO 061/94**: Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNER-ME061-94.pdf. Acesso em: 22 jun. 2021.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-PRO 273/96**: Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”: procedimento. Rio de Janeiro, 1996. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dner-pro273-96.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes/ IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **DNIT 005/2003-TER**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf. Acesso em: 26 jul. 2021.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes/ IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual para utilização do método mecanístico-empírico BackMeDiNa**: apresentação dos programas. Convênio UFRJ/DNIT. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1.5>. Acesso em: 15 jul. 2021.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes/ IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual para utilização do método mecanístico-empírico MeDiNa: apresentação dos programas.** Convênio UFRJ/DNIT. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1.5>. Acesso em: 20 jul. 2021.

FRITZEN, M. A. **Avaliação de soluções de reforço de pavimentos asfálticos com simulador de tráfego da rodovia Rio Teresópolis.** Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.

FRITZEN, Marcos Antonio. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos.** 2016. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/391-2016/4707-marcos-antonio-fritzen>>. Acesso em: 15 jul. 2021.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Guia para utilização de método mecanístico-empírico: apresentação dos programas desenvolvidos.** Relatório Parcial IV(A). Convênio UFRJ/DNIT. Projeto DNIT TED n. 682/2014. 2018. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manual-de-utilizacao-medina.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2021.

FARIAS, M.M., MONTEIRO, S.A. **Utilização de modelos elásticos lineares e não-lineares na retroanálise de propriedades de pavimentos.** Salvador, 1996.

GUABIROBA, J.J.O.C. **Estudo Sobre fadiga de misturas msfálticas produzidas em Goiás.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da UFG, Goiânia, 2020.

DNIT. **Instrução de serviço – IS 247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa.** Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/is-247_estudos-para-elaboracao-de-projetos-de-implantacao-usando-o-metodo-de-dimensionamento-nacional.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

Leal, U. **Sobras que valem uma obra.** TECHNE: Revista de Tecnologia da Construção, v.10, n.55, p.10-14,2001.

LOPES, Rosilene Alves. **Avaliação de programas de retroanálise de bacias deflectométricas - aplicação a um trecho de uma rodovia federal.** 2019. 263 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2019-1/3397-lopes-ra-tm-19-1>>. Acesso em: 11 out. 2019.

MEDINA, J., MACÊDO, J.A.G., MOTTA, L.M.G., Utilização de Ensaio Defletométrico e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos. Belo Horizonte, 1994.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos.** Editora UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 380 p, 1997.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos.** Rio de Janeiro: Interciência, 3ª ed., 2015.

MARCON, Antonio Fortunato. **Contribuição ao desenvolvimento de um Sistema de Gerência de Pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina.** 1996. 398f. Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.

MARQUES, Michelle de Oliveira. **Avaliação de trechos de pavimentos experimentais construídos com materiais alternativos na região metropolitana de Goiânia**. Goiânia, 2012.

MORAES, Carla Gonçalves de. **Análise de Bacias deflectométricas obtidas por 4 equipamentos do tipo Falling Weight Deflectometer (FWD)**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

NOBREGA, Eduardo Suassuna. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, 2003.

NERY, Claudia Celene Zago. **Comparativo entre deflexões com Viga Benkleman, FWD e LWD na avaliação estrutural e dimensionamento de reforço de pavimentos**. Joinville, 2020.

OLIVEIRA, João Carlos de. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

RODRIGUES, M., FELEX, J., LUCENA, F., PONTES, G. *Análise dos Módulos de Elasticidade Estimados a partir de Dados Coletados com o pressômetro Pencil*. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, BA, 1996.

SOUZA JÚNIOR, José Geraldo de. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. 2018. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2018/3240-junior-jgs-tm-18-1>>. Acesso em: 10 jul. 2021

SILVA, J. E. G. **Método nacional de dimensionamento de pavimentos – MEDINA, avaliação da duplicação da AL-145**. Trabalho de Conclusão de Curso, UFAL. Delmiro Gouveia, AL, 2018.

THOLEN, O., SHARMA, J., TERREL, R. *Comparison of Falling Weight Deflectometer with Other Deflection Testing Devices*. Transportation Research Board 1007, Washington, DC, 1985.

THEISEN, Klaus Machado; MATTOS, João Rodrigo G.; TREICHEL, Diego Skolaude; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. **Metodologia de emprego de softwares de retroanálise de bacias obtidas via Falling Weight Deflectometer (FWD) considerando casos de carregamento com eixo padrão**. In: GEORS - SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, 5., 2009, Pelotas.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto**. 1997. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Saneamento e Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. 1997.

**APÊNDICE A – RESULTADOS DE VIGA BENKELMAN PARA A PISTA
EXPERIMENTAL DE OLIVEIRA (2007) – CONSTRUÇÃO (JAN/2004)**

Tabela 8 – Leituras das deflexões medidas pelo ensaio de Viga Benkelman

ESTACA	LEITURAS									D ₀	D ₂₅	R m	RxD ₀
	L ₀	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L ₁₂₅	L ₁₅₀	L ₁₇₅	L ₂₀₀				
2+15 BE	600	591	585	581	579	578	577	577	577	46	28	174	7986
3 BD	600	590	585	584	583	583	583	583	582	36	16	156	5625
3+5 BE	600	591	585	583	582	582	582	582	582	36	18	174	6250
3+10 BD	600	591	583	580	577	575	574	574	573	54	36	174	9375
3+15 BE	600	590	586	583	581	581	580	580	579	42	22	156	6563
4 BD	600	590	582	575	573	571	570	570	569	62	42	156	9688
4+5 BE	600	591	582	580	577	577	576	576	575	50	32	174	8681
4+10 BD	600	593	584	579	576	575	574	574	573	54	40	223	12054

Fonte: Oliveira (2007)

Tabela 9 – Valores de deflexão para a pista experimental da CEASA-GO

ESTACA	DEFLEXÕES								
	D ₀	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	D ₁₂₅	D ₁₅₀	D ₁₇₅	D ₂₀₀
2+15 BE	46	28	16	8	4	2	0	0	0
3 BD	36	16	6	4	2	2	2	2	0
3+5 BE	36	18	6	2	0	0	0	0	0
3+10 BD	54	36	20	14	8	4	2	2	0
3+15 BE	42	22	14	8	4	4	2	2	0
4 BD	62	42	26	12	8	4	2	2	0
4+5 BE	50	32	14	10	4	4	2	2	0
4+10 BD	54	40	22	12	6	4	2	2	0

Fonte: Oliveira (2007)