



**UNICHRISTUS – CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL**

IRAN GONÇALVES VIEIRA NETO

**RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS PARA OBTENÇÃO DO
MÓDULO DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO. ESTUDO DE
CASO: BR 304 - RN**

FORTALEZA – CE

2020

IRAN GONÇALVES VIEIRA NETO

RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS PARA OBTENÇÃO DO
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DAS CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO. ESTUDO DE
CASO: BR 304 - RN

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

Orientador: Prof. Me. Lucas Cavalcante de
Almeida.

FORTALEZA – CE

2020

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

V657r Vieira Neto, Iran Gonçalves.

RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS PARA
OBTENÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DAS CAMADAS DE
PAVIMENTAÇÃO. ESTUDO DE CASO: BR 304 - RN / Iran
Gonçalves Vieira Neto. - 2020.

59 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,
Fortaleza, 2020.

CDD 624

IRAN GONÇALVES VIEIRA NETO

RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS PARA OBTENÇÃO DO
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DAS CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO. ESTUDO DE
CASO: BR 304 - RN

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

Orientador: Prof. Me. Lucas Cavalcante de
Almeida.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

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

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

Profa. Ma. Paula Nobre de Andrade
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais uma vitória conquistada em minha vida. A minha mãe (Lucia Silveira) agradeço pela oportunidade e por todo apoio incondicional durante a minha jornada na graduação e na vida.

A minha noiva Camila Moreira agradeço por todo incentivo e ajuda durante o desenvolvimento do trabalho e por estar ao meu lado em todas as decisões e escolhas da vida.

Agradeço aos meus amigos (Felipe, Roger, Yuri, Rodrigo, Jeferson e Nayara) por toda a amizade e parceria construída nessa graduação.

Agradeço ao meu orientador Ms. Lucas Cavalcante por toda paciência e auxílio durante esse trabalho.

Agradeço aos professores Ms. Fernando Dacio, Ma. Paula Nobre e Ms. Dênnys Araújo pela participação na banca e por todas as dicas e orientações passadas.

Agradeço ao Centro Universitário Christus, coordenação, corpo docente e funcionários, que me proporcionaram um ambiente propício para o aprendizado e me auxiliaram no crescimento pessoal e profissional nesses 5 anos de convívio.

RESUMO

O crescimento de um país está diretamente ligado à sua infraestrutura de transportes. Todo o deslocamento realizado por humanos e mercadorias, fatores de extrema importância para o crescimento de uma nação, necessita de boas condições de seus meios de transporte, visando, principalmente, a diminuição dos custos e um aumento da lucratividade. Para a realização de manutenções assertivas e de qualidade, avaliações dos pavimentos necessitam ser executados. Essas avaliações podem ser do tipo funcional, com análises visuais e da segurança do pavimento, realizadas por pessoas capacitadas, ou estrutural, quando ensaios são realizados podendo ser dos tipos destrutivo ou não destrutivo. O presente estudo trata da análise de dados obtidos através da realização de ensaio estrutural não destrutivo, utilizando o equipamento FWD, na rodovia BR-304 em trecho localizado no estado do Rio Grande do Norte. Para análise desses dados, foram utilizados 2 programas, *BackMedina* e *BackCAP*, para obtenção do módulo de resiliência para análise da rodovia em questão, seu pavimento e camadas granulares, verificação da qualidade do dimensionamento realizado em sua construção, além de possibilitar uma análise estatística comparativa entre os resultados encontrados, além de verificar a eficiência dos programas utilizados. Após a realização da retroanálise nos dois programas, verificou-se que, para o programa *BackCap*, os valores de revestimento e base foram satisfatórios, porém para sub-base e subleito os valores ficaram, em sua maioria, fora do intervalo padrão. No programa *BackMedina* houve uma maior variação nos resultados, obtendo valores como variações mais similares para todas as camadas em um mesmo ponto do trecho. Na análise com o método exposto na norma do DNER (1979) mais de 90% dos resultados obtidos demonstram que o pavimento não está em boa qualidade estrutural e necessita de correção. Houve resultados contrários para o mesmo ponto do trecho, levando em conta as análises realizadas, podendo ter sido causado pela equação de correlação utilizada.

Palavras-chave: Pavimentos Flexíveis. Avaliação Estrutural. Retroanálise.

ABSTRACT

A country's growth has been directly linked to its transportation infrastructure. All the displacement made by humans and goods, factors of extreme importance for the growth of a nation, needs good conditions of its means of transport, aiming mainly at reducing costs and increasing profitability. In order to carry out assertive and quality maintenance, pavement assessments need to be performed. These estimates can be of the functional type, with only visual and safety analysis of the pavement, performed by skilled or structural persons, when testing is performed as being destructive or non-destructive. The present study deals with the analysis of data obtained through a non-destructive structural test using the FWD equipment, carried out on the BR-304 highway located in the state of Rio Grande do Norte. To analyze this data, 2 programs, BackMedina and CAP3D will be used to obtain the resilience module for the analysis of the highway in question, its pavement and granular layers, verification of the quality of the sizing performed in its construction, besides allowing an analysis, comparative statistics between the results found, besides verifying the efficiency of the programs used. After performing the back analysis in both programs, it was found that, for the BackCap program, the covering and base values were satisfactory, but for sub-base and sub-grade the values were mostly outside the standard interval. In the BackMedina program, there was a greater variation in the results, obtaining values as more similar variations for all layers in the same point of the stretch. In the analysis with the method exposed in the DNER (1979) standard, more than 90% of the results obtained demonstrate that the pavement is not in good structural quality and needs correction. There were opposite results for the same point of the stretch, taking into account the analyzes performed, which may have been caused by the correlation equation used.

Keywords: Flexible Pavement. Structural assessment. Back Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Valor de Serventia.....	16
Figura 2 - Esquema da Viga <i>Benkelman</i>	24
Figura 3 - Viga <i>Benkelman</i> em campo.....	25
Figura 4 - Equipamento FWD.....	26
Figura 5 - Prato de aplicação das cargas pelo FWD	26
Figura 6 - Esquema de medidas FWD.....	27
Figura 7 - Valores verificado no programa no ensaio com FWD	27
Figura 8 - Trinca couro de jacaré	31
Figura 9 - Trinca em bloco	32
Figura 10 - Trincas transversais curta (esq.) e longa (dir.)	32
Figura 11 - Trinca longitudinal.....	33
Figura 12 - Afundamento por consolidação local	34
Figura 13 - Afundamento por consolidação em trilha de roda	34
Figura 14 - Afundamento plástico	35
Figura 15 - Exemplo de corrugação.....	36
Figura 16 – Defeito panela	36
Figura 17 - Localização da coleta dos dados	38
Figura 18 - Fluxograma	40
Figura 19 – Interface <i>BackCap</i>	49
Figura 20 – Interface <i>BackMedina</i>	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Método das Diferenças Acumuladas	42
Gráfico 2 - Qualidade Estrutural.....	45
Gráfico 3 – Raio dos segmentos (Viga <i>Benkelman</i>).....	45
Gráfico 4 - Raio FWD	46
Gráfico 5 - Comparativo dos raios	46
Gráfico 6 - Valores de d0 para viga <i>Benkelman</i>	47
Gráfico 7 - Valores de d0 para FWD.....	48
Gráfico 8 - Comparativo das deflexões.....	48
Gráfico 9 - Valores do Módulo de Resiliência <i>BackCap</i>	50
Gráfico 10 - Valores do Módulo de Resiliência <i>BackMedina</i>	51
Gráfico 11 - Comparativo da Retroanálise.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de Serventia.....	17
Tabela 2 - Tipos de serviço em função do ICPF	18
Tabela 3 - Frequência para o cálculo do IGGE	18
Tabela 4 - Pesos para o cálculo do IGGE	19
Tabela 5 - Classificação dos valores para classificação do IES	19
Tabela 6 - Classificação IES por segmento.....	20
Tabela 7 - Escala limite de IGG	21
Tabela 8 – Fator de ponderação para o cálculo do IGG	21
Tabela 9 - Condições de superfície de pavimentos flexíveis	22
Tabela 10 - Coordenadas Geograficas da Coleta de Dados	37
Tabela 11 - Estrutura do Pavimento	39
Tabela 12 - Criterios para intervalo do limite de aceitação	43
Tabela 13 - Fator de Correção Sazonal.....	44
Tabela 14 - Qualidade estrutural do pavimento.....	44
Tabela 15 – Valor Padrão do Módulo de Resiliência	51

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials;</i>
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente;
CNT	Confederação Nacional do Transporte;
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes;
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer;</i>
ICPF	Índice de Condição do Pavimento Flexível;
IES	Índice de Estado de Serviço;
IGG	Índice de Gravidade Global;
IGGE	Índice de Gravidade Global Estendido;
LVC	Levantamento Visual Contínuo;
UFC	Universidade Federal do Ceará;
VB	Viga <i>Benkelman</i> ;
VSA	Valor de Serventia Atual.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivos.....	13
1.1.1. <i>Objetivo Geral</i>	13
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i>	13
1.2. Estrutura do Trabalho	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1. Avaliação do Pavimento	15
2.1.1. <i>Avaliação Funcional</i>	15
2.1.1.1. <i>Avaliação Funcional Subjetiva</i>	16
2.1.1.2. <i>Avaliação Funcional Objetiva</i>	20
2.1.2. <i>Avaliação Estrutural</i>	22
2.1.2.1. <i>Avaliação Estrutural Destrutiva</i>	22
2.1.2.2. <i>Avaliação Estrutural Não Destrutiva</i>	23
2.2. Equipamentos	23
2.2.1. <i>Viga Benkelman</i>	23
2.2.2. <i>FWD (Deflectômetro de Impacto)</i>	25
2.3. Módulo de Resiliência	29
2.4. Defeitos em Pavimentos Flexíveis Associados a Estrutura.....	30
2.4.1. <i>Fenda</i>	30
2.4.1.1. <i>Fissura</i>	30
2.4.1.2. <i>Trinca</i>	30
2.4.2. <i>Afundamentos</i>	33
2.4.3. <i>Corrugações</i>	35
2.4.4. <i>Panela (Buraco)</i>	36
3. METODOLOGIA	37
3.1. Materiais.....	37
3.1.1. <i>Softwares Utilizados</i>	38
3.2. Método de Coleta e Análise dos Dados	39
4. RESULTADOS.....	41
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

O crescimento de um país ou região está diretamente ligado à sua infraestrutura de transportes. O deslocamento humano e, principalmente, o de bens de consumo é fator predominante para o crescimento econômico de um determinado local. Existem vários meios para o transporte utilizados atualmente, meios esses que podem ser chamados de modos de transporte, tendo como principais os modos rodoviários, ferroviários, aquaviários, aeroviário e dutoviários.

No Brasil, existe uma predominância no transporte rodoviário, que, segundo dados referentes ao ano de 2019, fornecidos pela Confederação Nacional do Transporte, é responsável por mais de 90% do deslocamento de pessoas e 60% dos deslocamentos de cargas e mercadorias em território nacional. O fato de grande parte da população utilizar esse meio de transporte, torna necessário maiores intervenções de manutenção e correção de problemas, porém, segundo o mesmo estudo da CNT, nos 107.161 quilômetros de estradas analisadas, 57% das rodovias apresentam algum tipo de deficiência, isso equivale a 61.080 quilômetros. Se tratando apenas da região Nordeste, os resultados são bem parecidos com o geral, apenas com um pequeno aumento, de 58,3% do total analisado (CNT, 2019).

Em todo o território nacional, existem hoje cerca de 213.453 quilômetros de rodovias asfaltadas, comportando apenas 12,4% do total de rodovias. Se tratando apenas de rodovias federais, nos últimos 10 anos houve um aumento de apenas 6,7% na quantidade de rodovias pavimentadas. O Nordeste é a região com a maior quantidade percentual de rodovias federais asfaltadas com 31,2% do total. Já na frota de carros, ocorreu um aumento de 80,8% em todo o país nos últimos 10 anos, aumentando assim também a densidade veicular nas rodovias. Com resultados ainda maiores que o nacional, o Nordeste alcançou um aumento de 128,7% de sua frota no mesmo período (CNT,2019).

Com o aumento da frota e a necessidade de melhores rodovias, visando a economia e a funcionalidade, faz-se necessário um melhor dimensionamento e acompanhamento dos estados das rodovias. Um bom dimensionamento de um pavimento asfáltico, tem como objetivos evitar problemas estruturais na via, como trincas ou buracos, e proporcionar conforto e segurança aos motoristas.

Após a liberação para tráfego de uma rodovia, a mesma começa sofrer desgaste devido, por exemplo, ao uso e a intempéries. Para que essas manutenções sejam realizadas de forma adequada, é necessário conhecer os pavimentos aos quais

estão sendo tratados. Em casos onde não se tem um conhecimento mais aprofundado do pavimento, pode-se realizar análises estruturais e funcionais, entre outras.

Problema recorrente há muito tempo no Brasil, como comentado por Souza *et al.* (1988), é necessária uma análise mais criteriosa das rodovias brasileiras para verificação das causas da baixa qualidade encontrada nos pavimentos e mesmo depois de vinte anos, o problema persiste como pode-se verificar em CNT (2019), de informações do Fórum Econômico Mundial, onde o Brasil se encontra na colocação 116º no ranking mundial de qualidade das rodovias.

A avaliação funcional se trata da determinação do desempenho no quesito funcional, no caso, a capacidade do pavimento de levar conforto e segurança ao usuário. Já a avaliação estrutural se trata da capacidade do pavimento em manter sua capacidade estrutural, ou seja, suportar as cargas as quais está sendo submetida sem sofrer avarias permanentes (DNIT, 2006).

Para avaliação estrutural de um pavimento, são utilizados os equipamentos com a viga *Benkelman* ou o FWD (*Falling Weight Deflectometer*), que demonstram, através da retroanálise, a bacia deflectométrica do pavimento, utilizado para obtenção do módulo de resiliência das camadas granulares e do solo da fundação (MEDINA; MOTTA, 2015). Após utilizar em conjunto o módulo de resiliência obtido e os dados de espessura do pavimento, é possível se obter uma base de dados do nível de degradação do pavimento e quais serviços podem ser realizados para correção do pavimento.

Mais recente e utilizado até hoje pelo Departamento Nacional de Trânsito (DNIT), o FWD é, segundo Bernucci *et al.* (2010), um ensaio não destrutivo e dinâmico, podendo ser usados para controle da capacidade do pavimento. Ambos os equipamentos tem o mesmo intuito, porém demonstram resultados numéricos completamente diferentes.

Com os dados calculados por ambos os equipamentos, o módulo de resiliência é obtido através de programas computacionais específicos. Nesse estudo, serão utilizados dois programas computacionais: o *BackMedina*, sistema criado pelo engenheiro civil e professor Jacques de Medina e que está em homologação para utilização pelo DNIT e o *BackCAP*, sistema desenvolvido na UFC (Universidade Federal do Ceará).

É de extrema importância confirmar a confiabilidade do modelo e sistema computacional que está sendo utilizado em quaisquer que sejam as áreas de atuação

e na análise de um pavimento. Dessa forma, a análise comparativa realizada, usando dados de um mesmo local de forma estatística, comprova, de certo modo, a confiabilidade dos programas computacionais utilizados, obtendo assim valores de maior confiabilidade. Além disso, é possível visualizar possíveis discrepâncias dos resultados e, com isso, verificar a confiabilidade dos dados apresentados por cada sistema utilizado.

1.1. Objetivos

Neste tópico serão apresentados os objetivos gerais e específicos, vislumbrando o atendimento de todos os parâmetros, resultados esses que serão apresentados através de um comparativo entre os parâmetros obtidos.

1.1.1. Objetivo Geral

Estimar e comparar, com valores padrão, o módulo de Resiliência por retroanálise para as camadas do pavimento, por meio de programas computacionais.

1.1.2. Objetivos Específicos

- ✓ Avaliar o dimensionamento do pavimento;
- ✓ Averiguar a qualidade das camadas granulares e do revestimento;
- ✓ Avaliar a confiabilidade dos programas utilizados;
- ✓ Analisar estatisticamente os módulos de resiliência.

1.2. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está subdividido em cinco partes conforme as informações apresentadas a seguir:

O Capítulo 1 consiste na introdução do estudo, mostrando a contextualização do tema, além dos objetivos, estrutura do trabalho, justificativa e problemática, relacionando avaliação estrutural de pavimentos rígidos com problemas encontrados nas rodovias brasileiras, além de dados introdutórios da problemática. Este tópico introduz os ensaios e softwares que serão utilizados no estudo.

O Capítulo 2 apresenta as definições estudadas ao longo da pesquisa, com uso de artigos, teses, dissertações e documentos de agências regulamentadoras para pavimentação, que definem as condições adequadas da estrutura para que tenha o melhor desempenho e vida útil, além de ensaios que tratam da qualidade de

pavimentos rígidos e de suas camadas, incluindo pesquisas que influenciaram no desenvolvimento deste trabalho, mostrando assim a intervenção deste estudo na avaliação das rodovias.

O Capítulo 3 se refere aos materiais e métodos da pesquisa, os equipamentos e *softwares* utilizados, a análise dos dados obtidos e os aprimoramentos dos mesmos através das imagens processadas, além da descrição dos trechos escolhidos para a execução dos ensaios.

O Capítulo 4 apresenta os dados comparativos obtidos nos programas computacionais, utilizando dados de ensaio com FWD na BR 304. Será verificado o módulo de resiliência do pavimento e realizado um comparativo entre os resultados, afim de obter averiguar a confiabilidade dos programas.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta a conclusão e as propostas para trabalhos futuros, seguido das referências anteriormente citadas e discutidas que foram utilizadas para a execução deste trabalho de conclusão de curso.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Será realizada uma revisão literária sobre avaliação de pavimentos rodoviários, dos tipos funcional e estrutural, além dos ensaios utilizando os equipamentos Viga *Benkelman* e FWD, equipamentos esses amplamente utilizados para realização de avaliação estrutural.

2.1. Avaliação do Pavimento

O principal objetivo de um pavimento é prover condições básicas de utilização, com segurança e conforto para o usuário e para garantir que esses quesitos sejam atendidos, faz-se necessário a realização de avaliações para manutenção de níveis aceitáveis. Para garantir a qualidade do pavimento pela percepção do usuário, realiza-se avaliações funcionais do pavimento e para verificação das camadas do pavimento, é necessário a realização de avaliações estruturais.

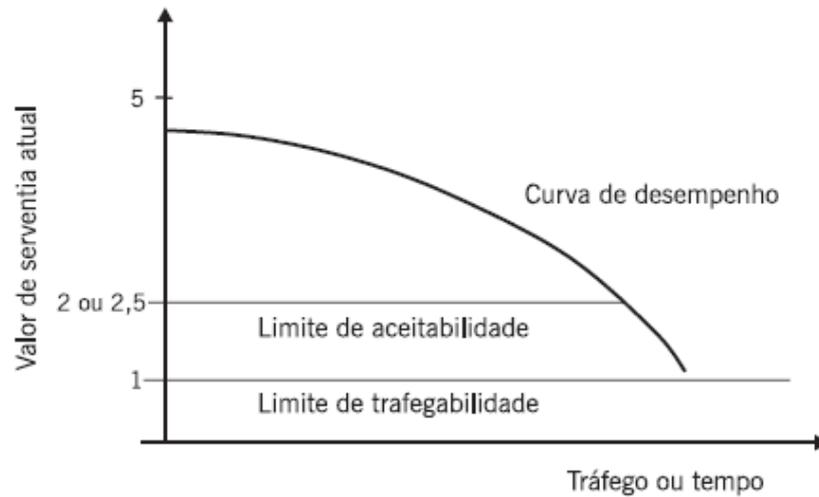
2.1.1. Avaliação Funcional

A avaliação funcional de um pavimento tem relação direta com a superfície do pavimento, a segurança e conforto ao rolamento do pavimento. Essa avaliação pode ser tratada de forma subjetiva ou objetiva, as duas descritas em normas do DNIT datadas de 2003.

A avaliação funcional encontrada na literatura, dado o tipo de análise dividindo em VSA (Valor de Serventia Atual), como exemplificado na Figura 1, e o LVC (Levantamento Visual Continuou), que se enquadram na avaliação subjetiva, além dos tipos IGG (Índice de Gravidade Global) e Irregularidade de Superfícies, que seriam tratadas na avaliação objetiva (PINTO; PREUSSLER, 2010).

Segundo Bernucci *et al.* (2010) a avaliação funcional de um pavimento trata da perspectiva da superfície do pavimento e de que forma interfere na condição do rolamento. A primeira forma de aferir a funcionalidade de um trecho do pavimento foi o modelo de serventia, de acordo com o gráfico presente na Figura 01, idealizado por Carey e Irick (1960) na Pista Experimental da AASHO (atualmente AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*)) (BERNUCCI *et al.*, 2010; PINTO; PREUSSLER, 2010).

Figura 1 – Valor de Serventia



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

2.1.1.1. Avaliação Funcional Subjetiva

A avaliação subjetiva da superfície de um pavimento, sendo ele flexível ou semirrígido, trata o nível de conforto e suavidade de rolamento gerada pelo pavimento, tomando como base o VSA (DNIT, 2003c).

O VSA é um valor de medida subjetiva das condições da superfície de um pavimento, realizado por cinco pessoas capacitadas, e com conhecimento completo da norma, que se deslocam por todo o trecho ao qual será realizada a análise, assinalando suas opiniões acerca do pavimento e sua capacidade de atender suas necessidades de tráfego (DNIT, 2003c). A qualidade da avaliação desse grupo deve ser, quando possível, com outro grupo, dessa vez composto por dez a quinze membros com experiência e conhecimento acerca do assunto, através de uma verificação experimental.

As especificações do DNIT (2003c) tratam que devem ser escolhidos dez trechos, sendo cada um com o comprimento máximo de 2 quilômetros, com aparência extremamente uniformes, porém com grandes variações na situação do pavimento, situados em sequência para que a análise possa ser realizada em um curto período de tempo, sempre sinalizando de forma visível do início e fim dos ciclos.

Após o término das avaliações, os valores obtidos individualmente de cada trecho serão comparados e será considerada boa, caso os valores médios obtidos tenham discrepância de no máximo 0,3. No processo de avaliação os avaliadores

poderão assinalar a qualidade do pavimento com notas de 0,0 a 0,5, com conceitos de “Péssimo” a “Ótimo”, com apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Níveis de Serventia

VSA	Classificação do segmento
4 a 5	Ótimo
3 a 4	Bom
2 a 3	Regular
1 a 2	Ruim
0 a 1	Péssimo

Fonte: Adaptado de (DNIT, 2003c)

Os resultados obtidos são analisados de forma isolado e adquiridos através da Equação 1 abaixo:

$$VSA = \frac{\sum x}{n} \quad (1)$$

Onde:

VSA – Valor de Serventia Atual;

X – Valores de Serventia Atual individual atribuídos por cada membro do grupo;

n – Número de membros do grupo avaliado.

Outra forma possível de se realizar uma avaliação funcional subjetiva de um pavimento seria através do LVC, método esse que tem como intuito realizar uma análise contínua de toda a superfície de um pavimento. Nesse ensaio, avaliadores percorrem dentro de um veículo, uma extensão média de 1 quilômetro a uma velocidade de aproximadamente 30 a 40 quilômetros por hora (PINTO; PREUSSLER, 2010).

O ICPF (Índice de Condição do Pavimento Flexível) é uma verificação realizada também pelos avaliadores, de forma visual, no que se diz respeito ao conforto e a segurança do usuário. Para esse índice é atribuído valores de 0 a 5, semelhante aos critérios e valores utilizados no VSA, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de serviço em função do ICPF

Conceito	Descrição	ICPF
Excelente	Necessita apenas de conservação rotineira.	4,5 - 5,0
Bom	Aplicação de micro revestimento - desgaste superficial, trincas não muito severas em áreas não muito extensas.	3,5 - 4,0
Regular	Correção de pontos localizados ou recapiamento - pavimento trincado, com "panelas" pouco frequentes e com irregularidade longitudinal e/ou transversal.	2,5 - 3,0
Mal	Recapiamento com correções prévias - defeitos generalizados com correções prévias em áreas localizadas - remendos superficiais ou profundos.	1,5 - 2,0
Péssimo	Reconstrução - defeitos generalizados com correções prévias em toda a extensão; deterioração do revestimento e das demais camadas - infiltração de água e descompactação da base.	0,0 - 1,0

Fonte: Adaptado de (PINTO; PREUSSLER, 2010)

Para cada defeito em determinado segmento, um fator crescente de severidade é classificado de 1 a 3 e adota-se quanto a frequência do defeito os índices alta (A), média (M) e baixa (B), como apresentado na Tabela 3 (PINTO; PREUSSLER, 2010).

Tabela 3 - Frequência para o cálculo do IGGE

Nível	Fr (%)
B	30
M	50
A	80

Fonte: Adaptado de (PINTO; PREUSSLER, 2010)

Em contrapartida, o IGGE (Índice de Gravidade Global Expendito) pode ser calculado utilizando valores de frequência e um peso que é atribuído a cada defeito, como demonstrado na Tabela 4. Pinto e Preussler (2010) classificam os defeitos e caracterização a ponderação da seguinte forma:

- Trinca (FC-1, FC-2 ou FC-3);
- Afundamento Plástico (ALP e ATP);
- Ondulação (O);
- Panela (P);
- Exsudação (Ex);
- Desgaste (D);
- Remendo (R).

Tabela 4 - Pesos para o cálculo do IGGE

Tipo	Defeito	Fator de Ponderação
1	FC-1	0,2
2	FC-2	0,5
3	FC-3	0,8
4	ALP e ATP	0,9
5	O e P	1,0
6	Ex	0,5
7	D	0,3
8	R	0,6

Fonte: Adaptado de (PINTO; PREUSSLER, 2010)

Após a obtenção dos valores o IGGE é calculado utilizando a Equação 2 a seguir:

$$IGGE = \sum (Fr * Fp) \quad (2)$$

Onde:

Fr – Frequência relativa de cada defeito;

Fp – Fator de ponderação correspondente.

A partir do levantamento do ICPF e do IGG, obtém-se o valor do IES (Índice de Estado de Serviço). Esse valor é classificado de 0 a 10 e, aumenta à medida que os valores do ICPF e IGG se elevam, como exposto na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação dos valores para classificação do IES

Descrição	IES
$IGGE \leq 20$ e $ICPF > 3,5$	0
$IGGE \leq 20$ e $ICPF \leq 3,5$	1
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF > 3,5$	2
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF \leq 3,5$	3
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF > 2,5$	4
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF \leq 2,5$	5
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF > 2,5$	7
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF \leq 2,5$	8
$IGGE > 90$	10

Fonte: Adaptado de (PINTO; PREUSSLER, 2010)

Após a obtenção dos valores individualizados do IES, será realizado a segmentação do trecho quanto ao estado da superfície do pavimento, as agrupando de acordo com os critérios expostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação IES por segmento

IES	Classificação do segmento
0	Excelente
1 ou 2	Bom
3 ou 4	Regular
5 ou 7	Mau
> 7	Péssimo

Fonte: Adaptado de (PINTO; PREUSSLER, 2010)

2.1.1.2. Avaliação Funcional Objetiva

A avaliação objetiva da superfície de um pavimento, sendo ele flexível ou semirrígido, classifica e realiza o inventário de ocorrências aparentes e deformações permanentes das trilhas de roda (DNIT, 2003a). Já Pinto e Preussler (2010), caracteriza essa avaliação como IGG (Índice de Gravidade Global).

Segundo as especificações, duas definições importantes para a avaliação objetiva são a flecha da trilha de roda e a superfície de avaliação. A flecha da trilha de roda se trata da medida, em milímetros, da deformação permanente de uma vala compreendido pela trilha realizada entre a roda interna (TRI) e a trilha de roda externa (TRE), se tratando do ponto máximo, geralmente, no centro de depressão. Já a superfície de avaliação é a superfície cerceada pelas bordas das faixas de tráfego e por duas sessões transversais, situadas a 3 metros antes e 3 metros depois da estação.

Existem duas condições para aplicação, ou não, dessa avaliação. A primeira é quando for necessário um inventário de ocorrências e as prováveis causas, possibilitando uma avaliação mais completa. A outra seria pelo entendimento da necessidade de uma avaliação estrutural.

A execução do ensaio, como descrito na norma, se inicia com a localização das superfícies de avaliação de 20 em 20 metros sendo, em pista simples, com alternância do eixo de rolamento e, em pista dupla, na faixa de tráfego mais solicitada. Após a localização das superfícies de avaliação, elas devem ser demarcadas com tinta apropriada e com gabarito em traços de 0,3 metros por 0,025 metros alinhado com a seção transversal, sendo 0,06 metros a distância da extremidade externa até a borda do revestimento da pista de rolamento, tendo mais dois traços 3 metros antes e 3 metros depois.

Após a demarcação, as flechas devem ser medidas, em milímetros, em cada estação demarcada para execução nas trilhas de roda. Após toda a demarcação e medição, será inventariado os defeitos encontrados durante a demarcação de acordo com a especificação DNIT 005/2003-TER.

Para verificação dos valores obtido através do ensaio, são adotados os valores de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 - Escala limite de IGG

Conceito	Limites de IGG
Bom	0 - 20
Regular	20 - 80
Mal	80 - 150
Péssimo	> 150

Fonte: Adaptado de (PINTO; PREUSSLER, 2010)

Para cada defeito ou parâmetro estatístico das flechas verificado, se atribui um fator de ponderação que qualifica a importância no que se caracteriza a serventia do pavimento. A metodologia aplicada permite realizar uma análise das condições do pavimento para com o IGG e uma melhor interpretação das verificadas em cada segmento analisado, como demonstrado na Tabela 8 (PINTO; PREUSSLER, 2010).

Tabela 8 – Fator de ponderação para o cálculo do IGG

Ocorrência tipo	Defeitos	Fp
1	FC-1, F e T	0,2
2	FC-2, J e TB	0,5
3	FC-3, JE e TBE	0,8
4	ALP e ATP	0,9
5	O e P	1
6	Ex	0,5
7	D	0,3
8	R	0,6
9	Média das flechas	4/3
10	Média das variâncias das flechas	1

Fonte: Adaptado de (PINTO; PREUSSLER, 2010)

Onde:

Fp – Fator de Ponderação.

Com a obtenção do fator de ponderação é possível chegar ao valor real do IGG através das Equações 3, 4 e 5:

$$fr = \frac{fa}{n} * 100 \quad (3)$$

$$IGI = fr * fp \quad (4)$$

$$IGG = \Sigma IGI \quad (5)$$

Onde:

IGI – Índice de Gravidade Individual;

Fr – Frequência absoluta;

Fa – Frequência absoluta;

N – Número de estações.

Após a obtenção dos valores, é possível obter as condições demonstradas na Tabela 9.

Tabela 9 - Condições de superfície de pavimentos flexíveis

ICPF	Irregularidade		IGG	TR	Conceito
	QI (cont./km)	IRI (m/km)			
5 - 4	13 - 25	1 - 1,9	0 - 20	0 - 2	Excelente
4 - 3	25 - 35	1,9 - 2,7	20 - 40	2 - 5	Bom
3 - 2	35 - 45	2,7 - 3,5	40 - 80	05 - 10	Regular
2 - 1	45 - 60	3,5 - 4,6	80 - 150	10 - 25	Ruim
1 - 0	> 60	> 4,6	> 150	> 25	Péssimo

Fonte: Adaptado de (PINTO; PREUSSLER, 2010)

Onde:

ICPF – Índice de condição de pavimento flexível;

QI – Quociente de irregularidade;

IRI – Índice Internacional de Irregularidade;

TR – Trincamento (% de FC-2 + FC-3).

2.1.2. Avaliação Estrutural

A Avaliação estrutural do pavimento pode ser realizada de duas maneiras, através dos modos destrutivo e não destrutivo. A diferença entre os dois trata da necessidade ou não de realizar avaria no pavimento para realizar os testes.

2.1.2.1. Avaliação Estrutural Destrutiva

O modo de avaliação destrutiva tem esse nome devido a necessidade de destruir uma parte do pavimento, em um local específico do pavimento, para realizar a análise. Segundo Bernucci *et al.* (2010) nesse método existe a necessidade da abertura de trincheiras ou poços de sondagem para que seja possível realizar a análise das camadas do pavimento. Para cada camada que for retirada, análises serão realizadas nas camadas subsequentes.

Os ensaios destrutivos são indicados apenas para locais onde existam evidências de problemas estruturais severos ou em pavimentos que construídos para realização de testes (PEREIRA, 2007).

2.1.2.2. Avaliação Estrutural Não Destrutiva

Segundo Bernucci *et al.* (2010), a avaliação mais adequada para realização em rodovias com grandes extensões, vislumbrando a realização de várias repetições no mesmo ponto, visando o acompanhamento da variação na capacidade de carga, seria a avaliação não-destrutiva do pavimento. Os equipamentos de avaliação não-destrutiva de pavimentos podem ser divididos em: quase estático, vibratório ou por impacto.

2.2. Equipamentos

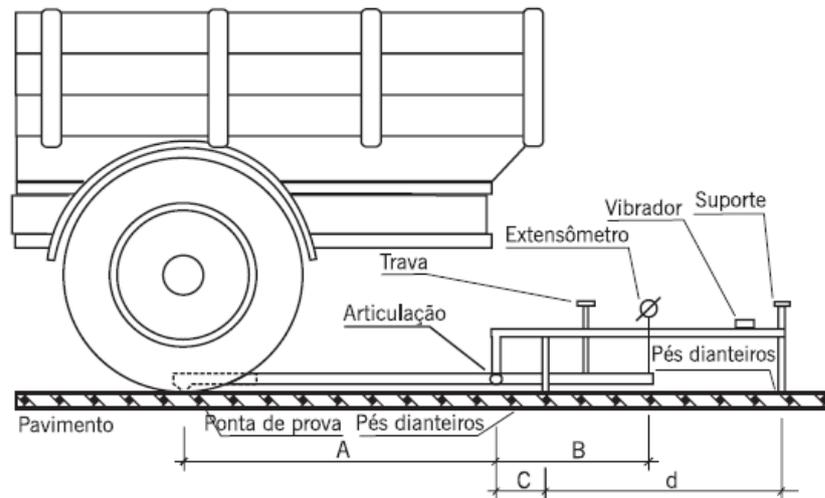
Nesse trabalho será abordada predominantemente o FWD e, para efeito de comparação, a viga *Benkelman*. A viga *Benkelman* se enquadra como equipamento no tipo de avaliação quase estático, já o FWD é um equipamento classificado como por impacto.

2.2.1. Viga *Benkelman*

Equipamento desenvolvido na *ASSHTO Road Test*, por A. C. Benkelman, engenheiro do Departamento de Transporte da Califórnia, na década de 1950. Utilizada em todo o mundo desde seu desenvolvimento, chegou ao Brasil no ano de 1962 e foi o principal equipamento utilizado no país até a década de 1990 (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNER, 1994b).

Em DNER (1994a), é descrito, de forma detalhada, os equipamentos e métodos utilizados para realização dos ensaios com o equipamento. A Viga *Benkelman* é constituída de um conjunto de sustentação com uma alavanca fixada formando dois braços com comprimentos a e b, relacionados em 2/1, 3/1 ou 4/1, como se pode observar na Figura 2 presente em DNER (1994a) e adaptada em Bernucci *et al.* (2010).

Para realização do ensaio, deve-se utilizar também um caminhão de eixo traseiro simples de roda dupla, carregado com 8,2 toneladas, para aplicação da carga no pavimento para aferição da deformação elástica, podendo ser utilizado cargas diferentes quando julgado conveniente.

Figura 2 - Esquema da Viga *Benkelman*

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

Para realização do ensaio, se coloca a ponta de prova da viga entre os pneus da roda geminada traseira do caminhão, exatamente sobre seu eixo. Posteriormente realiza-se uma medida inicial do extensômetro situado a uma distância onde o operador possa atuar com segurança, com isso obtendo-se o valor de L_i e faz-se o caminhão afastar-se 10 metros de distância ou até que o extensômetro não obtenha mais variações de leitura. Após todo o procedimento, realiza-se uma nova leitura para obtenção do valor final (L_f).

Com a obtenção das leituras iniciais e finais, que correspondem ao deslocamento recuperado e associado a deformação elástica do pavimento, pode-se calcular a deflexão utilizando a Equação 6. Abaixo, uma imagem da execução em campo do equipamento, na Figura 3.

$$d_0 = (L_i - L_f) * K \quad (6)$$

Onde:

d_0 – Deflexão real ou verdadeira, em centésimo de milímetro;

L_i – Leitura inicial, em centésimo de milímetro;

L_f – Leitura final, em centésimo de milímetro;

K – Constante da viga dada pela relação entre o braço maior e o menor

(a/b).

Comumente realiza-se a medição apenas da deflexão máxima e de mais um ponto, normalmente a 25 centímetros do inicial (d_{25}), para cálculo do raio de curvatura, que representa um arco de parábola que passa pelos dois pontos. É

utilizado Equação 7, descrita nas instruções do DNER 024/94, para realização desse cálculo.

$$R = \frac{6250}{2 * (d_0 - d_{25})} \quad (7)$$

Onde:

R – Raio de curvatura em metros;

d_{25} – Deflexão a 25 cm do ponto de prova, em centésimos de milímetros.

A Figura 3 mostra um exemplo do equipamento viga *Benkelman*.

Figura 3 - Viga Benkelman em campo



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

2.2.2. FWD (Deflectômetro de Impacto)

O deflectômetro de impacto FWD (*Falling Weight Deflectometer*), foi projetado para simular o efeito de passagem de uma carga de roda em movimento no pavimento (MORAES, 2015). Ele foi introduzido no Brasil no ano de 1989 e é projetado para simular o efeito das cargas oriundas dos veículos que passam pelo pavimento (BORGES, 2001). A Figura 4 mostra o equipamento FWD.

Figura 4 - Equipamento FWD



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

Segundo o DNER (1996), essa simulação é realizada através da queda de um conjunto de massas, de uma altura pré-fixada, sobre um sistema de amortecedores de borracha, que propaga a força aplicada até uma placa circular apoiada no pavimento como visto na Figura 5. Geralmente, a placa aplica, no pavimento, uma carga de 40kN, sendo alterada em função da necessidade até que seja alcançada a carga desejada.

Figura 5 - Prato de aplicação das cargas pelo FWD



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

Os deslocamentos regeneráveis verificados na superfície do pavimento, são medidos por sensores alocados ao longo de uma barra metálica instalada juntamente ao equipamento. Para o armazenamento das informações coletadas pelo equipamento, é necessário também a utilização de um sistema de controle de dados instalado no veículo que irá rebocar o equipamento de medição.

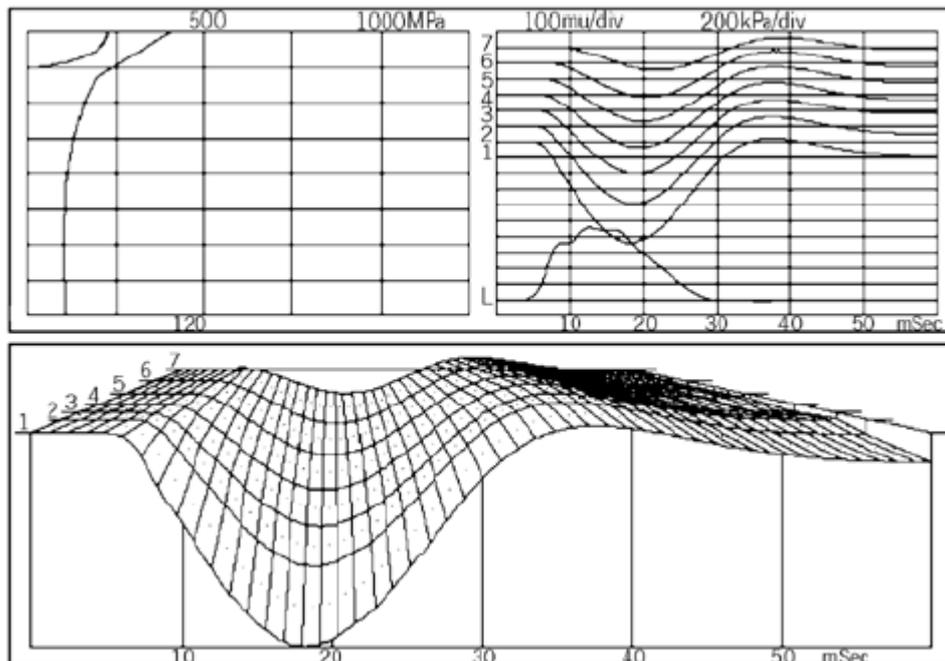
Pode-se observar na Figura 6 o impacto do equipamento no pavimento, simulando uma carga de roda a uma velocidade de 60 a 80 Km/h por um período de 25 a 33 milissegundos e na Figura 7, um exemplo das informações tratadas de um programa utilizado para o recebimento das informações (MORAES, 2015).

Figura 6 - Esquema de medidas FWD



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

Figura 7 - Valores verificado no programa no ensaio com FWD



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

O ensaio descrito pelo DNER (1996) trata-se da seguinte forma:

- Deve ser realizado o ajuste e calibragem do equipamento, procedimento que deve ser repetido em cada início de jornada de trabalho, utilizando as informações contidas na instrução do DNIT 132/2010 PRO;

- Deve-se programar no computador as unidades a serem utilizadas, o número de cargas a serem aplicadas durante o ensaio e as alturas de queda das cargas;
- Realizar a alocação das estações que devem estar espaçadas longitudinalmente de acordo com a necessidade do projeto e espaçadas do bordo de acordo com valores estabelecidos em norma.

A força de pico aplicada ao pavimento através da placa de impacto do FWD, pode ser calculada através da Equação 8.

$$F = \sqrt{2Mghk} \quad (8)$$

Onde:

F = Força de Pico;

M = Massa do peso que cai;

g = Aceleração da gravidade;

h = Altura de queda;

k = Constante do sistema de amortecedores.

Segundo Moraes (2015), pode-se verificar algumas vantagens e limitações acerca da utilização do FWD. As vantagens são:

- A deflexões produzidas pelo equipamento são as que mais se aproximam das geradas por um caminhão obtidas através de um acelerômetro instalado no pavimento;
- Possibilita a análise da não linearidade dos materiais constituintes do pavimento, a partir da variação da carga aplicada;
- Registro automático da temperatura do ambiente e do revestimento, além da distância do ponto medido.

Além das vantagens listadas acima, existem algumas limitações na utilização do equipamento, estando elas listadas abaixo.

- A presença de uma camada rígida no subleito pode alterar a bacia de deflexão, no entanto, também influencia nos outros ensaios não destrutivos possíveis;
- Necessidade frequente de novas calibrações;
- Elevado custo de aquisição.

2.3. Módulo de Resiliência

Segundo Coutinho (2011), o módulo de resiliência, ou resiliente, é utilizado para medir a deformação elástica, ou deformação recuperável, de um determinado material sujeito a cargas repetidas, como por exemplo as rodovias. Esse valor é determinado em solos e materiais não tratados com ligantes ou quaisquer produtos químicos, verificado através de ensaio triaxial cíclico.

Segundo Pinto e Preussler (2010), o estado de tensão de um meio elástico varia de acordo com a posição da carga móvel. Para obtenção do valor do módulo de resiliência, é utilizado a tensão desvio variável e a deformação resiliente e determinado pelas Equações 9, 10 e 11:

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (9)$$

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (10)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t - \varepsilon_p = \frac{\Delta h}{H_0} \quad (11)$$

Onde:

Mr – Módulo de resiliência ou relação tensão-deformação do material;

σ_d – Tensão desvio variável;

σ_3 – Tensão confinantes ou horizontal;

σ_1 – Tensão vertical;

ε_r ou ε_1 – Deformação resiliente axial (vertical);

ε_t – Deformação total (vertical);

ε_p – Deformação plástica (vertical);

Δh - Deslocamento vertical máximo;

H_0 – Comprimento inicial de referência da amostra de solo cilíndrica ensaiada.

Para DNIT (2018), o ensaio de obtenção do módulo de resiliência, utilizando equipamento triaxial de carga repetida, tem o objetivo de obter dados para várias combinações de tenção aplicada, sendo, o comportamento resiliente do material uma resposta elástica que resulta de uma carga aplicada em pulsos de curta duração.

2.4. Defeitos em Pavimentos Flexíveis Associados a Estrutura

Segundo Pinto e Preussler (2010), com os pavimentos e condições ambientais diferentes existentes, existem inúmeros catálogos e manuais para identificação e causas de defeitos, tanto nacionais quanto internacionais. No entanto, existe uma certa padronização os manuais mais utilizados.

2.4.1. Fenda

Para DNIT (2003b), qualquer descontinuidade na superfície do pavimento, que acarrete em uma abertura de quaisquer portes, é caracterizada como fenda, podendo ser subdivida em fissura e trinca.

2.4.1.1. Fissura

Fissuras são fendas de largura capilar existentes no revestimento, em qualquer direção em relação ao eixo da via, sendo visível apenas quando o observador estiver a uma distância de, no máximo, 1,5 metros. Esse defeito é caracterizado por, ainda, não causar problemas funcionais ao revestimento, não sendo assim consideradas quanto a gravidade nos métodos atuais (DNIT, 2003b).

2.4.1.2. Trinca

Trincas são fendas no revestimento facilmente visíveis, com aberturas de tamanhos superiores as das fissuras, podendo apresenta-se de forma isolada ou com várias trincas interligadas. As trincas isoladas são subdividas em trincas transversais, trincas longitudinais e trincas de retração, já as trincas interligadas são subdividas em trinca couro de jacaré ou em bloco (DNIT, 2003b).

Já para Pinto e Preussler (2010), as trincas podem ser subdividas em tipo crocodilo ou jacaré, em bloco, transversal ou longitudinal, de borda e parabólico. Entretanto, Bernucci *et al.* (2010) além da caracterização por tipologia similar as já expostas, caracteriza também por gravidade, onde a classe 1 apresenta fendas com aberturas não superior a 1 mm, classe 2 para fendas com abertura superior a 1 mm e, as de classe 3 que são caracterizadas por terem aberturas superiores a 1 mm e degradação por erosão nas bordas.

2.4.1.2.1. Trincas tipo couro de jacaré

Caracterizado por uma série de trincas interligadas sem direção preferencial, com formato semelhante ao couro de um jacaré, podendo apresentar ou não erosão acentuada nas bordas. Uma possível causa desse defeito é a ação repetidas das cargas de tráfego, podendo ser agravado pelas condições ambientais de temperatura e umidade (DNIT, 2003b; PINTO; PREUSSLER, 2010). Um exemplo desse tipo de defeito pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Trinca couro de jacaré



Fonte: (DNIT, 2003b)

2.4.1.2.2. Trincamento em bloco

O trincamento em bloco é caracterizado por ter um conjunto de trincas interligadas com uma regularidade geométrica acentuada em formato retangular, que diminuem à medida que a deformidade aumenta. Pode ser causado pela alternância diária de temperatura e umidade ou pela união de trincas longitudinais e transversais (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNIT, 2003b; PINTO; PREUSSLER, 2010). Pode-se verificar um exemplo desse tipo de defeito na Figura 9.

Figura 9 - Trinca em bloco



Fonte: (DNIT, 2003b)

2.4.1.2.3. Trincamento longitudinal e transversal

São trincas que se apresentam, quando longitudinal, perpendicular ao eixo da via ou, quando transversal, paralelas ao eixo da via, sendo consideradas defeitos estruturais e funcionais. Em ambos os sentidos, os defeitos podem ser considerados curtos quando sua extensão for inferior a 100 cm ou longas para extensões superiores a 100 cm. Normalmente podem ser causadas por mal execução das juntas de construção, contração ou dilatação do revestimento devido temperatura ou envelhecimento do asfalto e propagação de trincas existentes em camadas inferiores (DNIT, 2003b; PINTO; PREUSSLER, 2010). Pode-se verificar exemplos de trincas longitudinais na Figura 10 e de trinca transversal na Figura 11.

Figura 10 - Trincas transversais curta (esq.) e longa (dir.)



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

Figura 11 - Trinca longitudinal



Fonte: (DNIT, 2003b)

2.4.1.2.4. Trincas Parabólicas

Esse tipo de trinca se caracteriza por ocorrer em formato de meia lua, normalmente com as pontas voltadas para o sentido do tráfego. As fendas tem uma certa sincronicidade geométrica, podendo ser causadas pela má ligação entre a estrutura do pavimento e suas camadas inferiores ou pela baixa estabilidade da mistura asfáltica (PINTO; PREUSSLER, 2010).

2.4.2. Afundamentos

Para DNIT (2003b), o afundamento é caracterizado por depressões na superfície do pavimento, podendo apresentar-se sobre a forma de afundamento plástico ou de consolidação.

2.4.2.1. Afundamento por consolidação

O afundamento por consolidação é causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito. Uma subdivisão desse defeito se dá em relação a extensão do afundamento onde, para caso em que a depressão ocorra em uma extensão de no máximo 6 m é denominado afundamento de consolidação local, porém, para caso onde a depressão tenha uma extensão maior que 6 m e estiver localizado ao longo da trilha de roda, o defeito é tratado como afundamento de consolidação da trilha de roda (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNIT, 2003b;

PINTO; PREUSSLER, 2010). Pode-se verificar exemplos de afundamentos por consolidação local na Figura 12 e de consolidação por trilha de roda na Figura 13.

Figura 12 - Afundamento por consolidação local



Fonte: (DNIT, 2003b)

Figura 13 - Afundamento por consolidação em trilha de roda



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

2.4.2.2. Afundamento plástico

Se trata de uma depressão que se caracteriza na região solicitada, causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito. Utiliza-se a mesma denominação do afundamento por consolidação, com as subdivisões de, quando ocorrer em uma extensão de até 6 m, será um afundamento plástico local e quando ocorrer em uma extensão maior que 6 m, será um afundamento plástico em trilha de roda. Uma característica desse tipo de afundamento é que existe certa

compensação volumétrica, acarretando em um levantamento da massa asfáltica junto as bordas do local afetado (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNIT, 2003b; PINTO; PREUSSLER, 2010). Pode-se verificar exemplos de afundamentos plásticos na Figura 14.

Figura 14 - Afundamento plástico



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

2.4.3. Corrugações

São deformações por ondulação ou corrugação transversal ao eixo da pista, em geral compensatórias, com depressões intercaladas de elevações, de caráter plástico e permanente. Algumas causas para o surgimento das corrugações são a instabilidade da mistura betuminosa da camada de revestimento e/ou da base, excesso de umidade nas camadas inferiores, contaminação e/ou retenção de água na mistura asfáltica (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNIT, 2003b; PINTO; PREUSSLER, 2010). A Figura 15 apresenta um exemplo de pavimento que sofreu corrugação.

Figura 15 - Exemplo de corrugação



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

2.4.4. Panela (Buraco)

São cavidades formadas inicialmente no pavimento e com variadas dimensões e profundidades, podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento, provocando assim a desagregação dessas camadas. Pode ser causada pela falta de aderência entre camadas superpostas, podem acarretar no deslocamento das camadas, trincamento em estágio terminal ou evolução de outros defeitos (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNIT, 2003b; PINTO; PREUSSLER, 2010). A Figura 16 apresenta um exemplo de panela em um pavimento, além de verificar outros defeitos formados ao redor do mesmo.

Figura 16 – Defeito panela



Fonte: (DNIT, 2003b)

3. METODOLOGIA

O estudo em questão se trata de uma pesquisa exploratória, de caráter quantitativo, com uma amostragem não probabilística, tendo em conta os dados obtidos e intuito da análise desses dados e foi utilizada correlação para realização de análise estatística dos dados.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre avaliação estrutural não destrutiva, o estudo do módulo de resiliência, além de defeitos em pavimentos flexíveis causados por defeitos estruturais. Essa revisão bibliográfica forneceu a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento desse estudo específico, que tem como objetivo calcular e comparar o módulo de Resiliência por retroanálise para as camadas de um trecho da BR 304, localizada no estado do Rio Grande do Norte, por meio de programas computacionais.

3.1. Materiais

Para a realização da coleta dos dados utilizados nesse estudo, foi utilizado o equipamento FWD em um trecho da BR 304, localizada no estado do Rio Grande do Norte, entre o quilômetro 250 na cidade de Angicos e o quilômetro 350 na cidade de Mossoró.

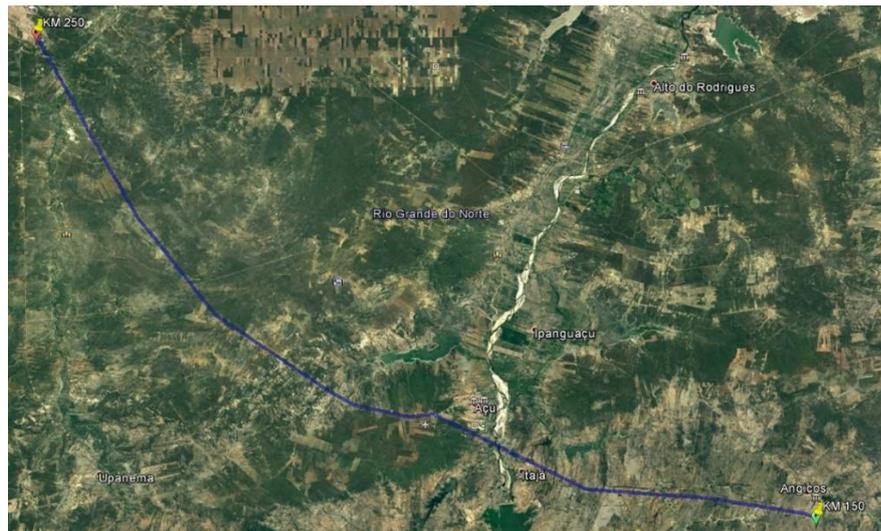
Essa rodovia foi escolhida para realização do estudo pois se trata de uma importante ligação entre a cidade de Natal no Rio Grande do Norte e o estado do Ceará. O comércio entre os estados é primordial, um exemplo é a castanha de caju, que o estado do Ceará é destino de aproximadamente 50% dos produtos oriundos da produção no Rio Grande do Norte (SEPLAN, 2016).

Tabela 10 - Coordenadas Geograficas da Coleta de Dados

	Cidade	Latitude	Longitude
Ponto Inicial	Angicos	5° 40' 03.02" S	36° 37' 30.49" O
Ponto Final	Mossoró	5° 14' 11.98" S	37° 19' 05.08" O

Fonte: (Google Earth, 2020)

Figura 17 - Localização da coleta dos dados



Fonte: (Google Earth, 2020).

3.1.1. Softwares Utilizados

Com a globalização, o mundo está, cada vez mais, tornando-se digital e a utilização de sistemas computacionais nas mais diversas áreas vem desenvolvendo grande importância para o avanço e aprimoramento da área. Na Engenharia Civil não poderia ser diferente, cada vez mais os sistemas vêm tendo um papel importante no dia-a-dia do engenheiro, desde o desenvolvimento e análise de novas matérias, até o de pavimentos, como no caso desse estudo.

Nesse estudo serão utilizados dois *softwares* de análise computacional: o *BackMedina* e o CAP3D.

O programa computacional *BackMedina* surgiu de uma evolução do programa Sispav, desenvolvido na tese de doutorado de (FRANCO, 2007). O programa tem o intuito de realizar a retroanálise dos módulos de resiliência de todas as camadas de um pavimento, utilizando os dados das bacias deflectométrica, coletadas através de equipamentos do tipo FWD (FRANCO; MOTTA, 2018). Foi utilizado no estudo a versão 1.1.3 de setembro de 2019 do programa.

O CAP3D ou *BackCAP* foi desenvolvido em 2015 na UFC (Universidade Federal do Ceará). O programa tem o mesmo intuito do *BackMedina* e se utiliza de dados das bacias deflectométricas, sendo também coletadas através de equipamentos do tipo FWD. O programa *BackCAP* foi concebido utilizando informações de materiais e solos encontrados no estado do Ceará.

3.2. Método de Coleta e Análise dos Dados

Utilizando o equipamento FWD, foi realizado a coleta de dados da deflexão, no trecho entre o km 150 e o km 250 da BR 304, no estado do Rio Grande do Norte. Foi realizado a análise no lado esquerdo da rodovia e foram obtidos 7 valores para local de aplicação da carga.

Inicialmente, utilizou-se as recomendações da AASHTO (1993) objetivando a separação dos trechos homogêneos do pavimento e conversão dos valores retirados do equipamento FWD, para dados compatíveis com o equipamento viga *Benkelman* (VB), visando a etapas seguintes do estudo.

Após os trechos homogêneos já estipulados, os dados compatíveis com VB já obtidos e seguindo as recomendações do DNER (1979), foram realizados os devidos cálculos para obtenção dos valores utilizados no dimensionamento do pavimento e do valor admissível para o revestimento, em relação a carga média recebida. Será verificado também o valor do raio do pavimento pois, quando comparado os dois valores em conjunto, chega-se há qualidade atual do pavimento e a necessidade, ou não, de correções de sua estrutura.

Após a obtenção dos dados, foram utilizados os programas computacionais *BackMedina* e *BackCAP* para análise dos dados e obtenção dos valores do módulo de resiliência por meio de retroanálise. Nos 2 programas, foram colocados igualmente as especificações do pavimento com as dimensões de cada camada e os dados obtidos, com isso, os programas retornaram com o valor do módulo de resiliência.

Por não possuir dados das camadas ou tráfego do trecho em análise, e para que os dados possam ser comparados de forma mais objetiva, serão adotados alguns parâmetros dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Estrutura do Pavimento

Camada	h (cm)	BackCAP		BackMedina	Poisson
		E _{min} (Mpa)	E _{max} (Mpa)	E (Mpa)	
Revestimento	7,5	2000	4500	4500	0,35
Base	20	300	800	450	0,3
Sub-Base	20	100	600	300	0,3
Subleito	0	100	600	150	0,4

Fonte: (Autor, 2020).

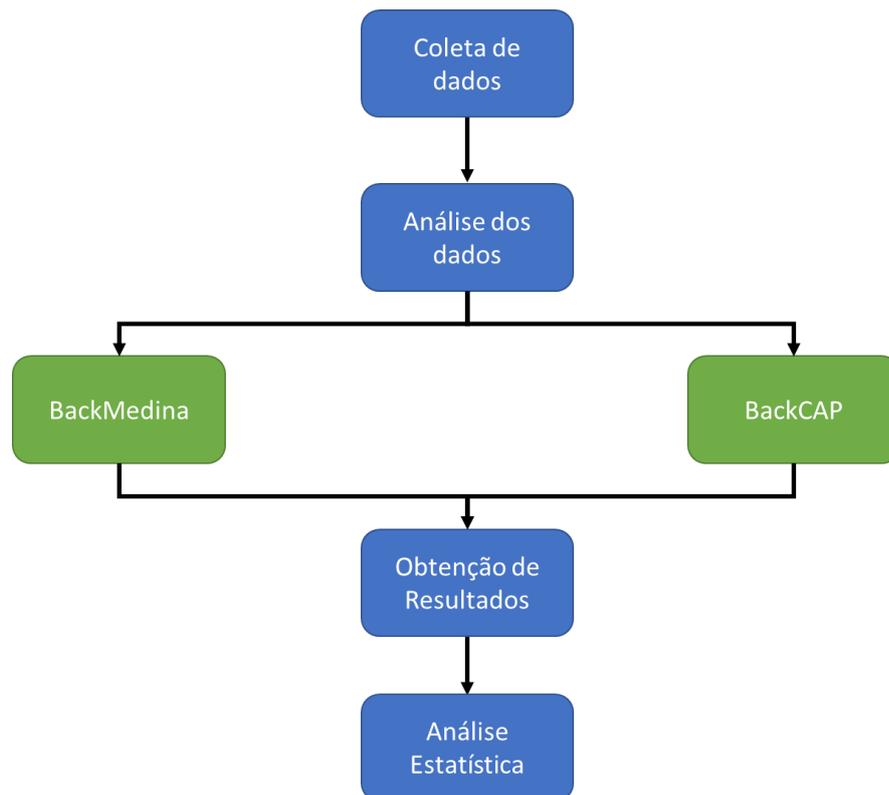
Foi realizada uma avaliação do módulo de resiliência calculada de acordo com o estipulado pela instrução do DNIT (2018) e um comparativo estatístico entre os

resultados encontrados, além dos resultados para as camadas granulares do pavimento.

A utilização de 2 programas distintos teve o intuito de averiguar a eficácia dos programas, avaliando os dados encontrados e realizando um comparativo entre eles e os valores obtidos em campo.

Após essas verificações, a comprovação da eficácia dos programas e a validação dos dados obtidos, foi possível avaliar a qualidade do dimensionamento do pavimento, levando em consideração também o tempo de utilização do pavimento.

Figura 18 - Fluxograma



Fonte: (Autor, 2020).

4. RESULTADOS

De acordo com DNER (1979), para verificação da qualidade estrutural da rodovia e almejando uma melhor atuação nas correções necessárias e um aumento da vida útil do pavimento, porém, o modelo de cálculo utilizado é padronizado para a utilização valores obtidos pelo equipamento *Viga Benkelman*. Para realizar a correlação dos dados, possuindo como base de dados os valores obtidos através do equipamento FWD e que serão utilizados nesse ensaio, utiliza-se a Equação 12.

$$D_{VB} = -5,73 + 1,396 * D_{FWD} \quad (12)$$

Onde:

D_{VB} = Dados obtidos da viga *Benkelman*;

D_{FWD} = Dados obtidos pelo FWD.

Após a adequação dos dados, os valores forem divididos por segmentos homogêneos do trecho correspondentes ao trecho de análise. Para a AASHTO (1993), utiliza-se o *Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences* ou, o Método das Diferenças Acumuladas.

Primeiramente deve-se calcular o valor médio (D) da deflexão para todo o trecho como descrito na Equação 13.

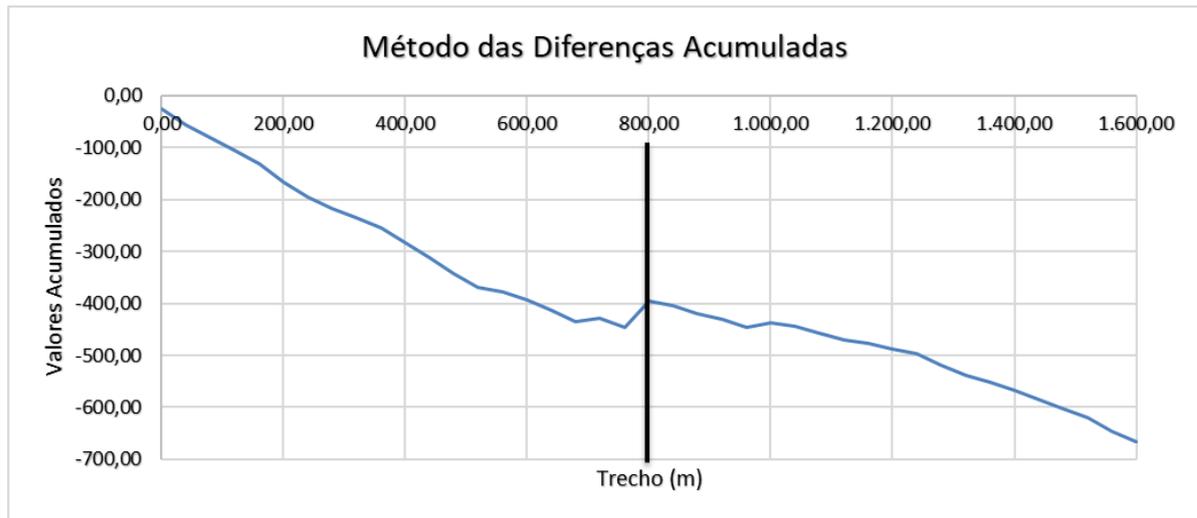
$$D = \frac{\sum Di}{n} = \frac{181.888.24}{2501} = 72,73 \text{ (0,01 mm)} \quad (13)$$

Em seguida, deve-se calcular a diferença entre cada valor individual e o valor médio encontrado. Com esses valores obtidos, obtém-se os valores acumulados dessa diferença utilizando a Equação 14.

$$\bar{D}_i = \frac{D(i-1) + Di}{2} \quad (14)$$

Após a obtenção da diferença para cada segmento, deve-se elaborar um gráfico com as distâncias na horizontal e as diferenças acumuladas na vertical. Com o gráfico elaborado deve-se verificar de forma visual as variações do coeficiente angular da curva obtida, essas alterações indicam uma mudança no comportamento médio do segmento analisado, podendo assim ser estipulado as extremidades dos segmentos homogêneos, como pode-se visualizar no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Método das Diferenças Acumuladas



Fonte: (Autor, 2020).

Utilizando um dos segmentos do trecho, caracterizado entre os quilômetros 19,64 e 20,56 do trecho, deve-se calcular a média aritmética (D) das deflexões dos valores obtidos em ensaio no ponto do primeiro ponto de contato do equipamento, como verificado na Equação 15.

$$D = \frac{\sum D_i}{n} = \frac{1.605,60}{24} = 66,90 \text{ (0,01 mm)} \quad (15)$$

Onde:

D = Média aritmética;

D_i = Valores individuais das deflexões recuperáveis encontradas;

n = Número de valores individuais computados.

Após a obtenção da média aritmética, deve-se calcular o valor do desvio padrão da amostra utilizando a Equação 16.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (D_i - D)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{3.789,78}{23}} = 12,84 \text{ (0,01 mm)} \quad (16)$$

Onde:

σ = Desvio padrão.

Será estabelecido um limite de aceitação dos valores individuais das deflexões coletadas através dos limites $D \pm Z \cdot \sigma$. Para verificação desses limites de aceitação, é obtido um coeficiente Z , em função do número de valores individuais computados, como demonstrado na Tabela 12. Com a obtenção desse coeficiente, utilizam-se as Equações 17.1 e 17.2 para delimitação dos limites.

Tabela 12 - Critérios para intervalo do limite de aceitação

n	Z
3	1
4	1,5
5 - 6	2
7 - 19	2,5
≥20	3

Fonte: Adaptado de (DNER, 1979).

$$\text{Limite 1} = D + Z * \sigma = 66,90 + 3 * 12,84 = 105,41 \text{ (0,01 mm)} \quad (17.1)$$

$$\text{Limite 2} = D - Z * \sigma = 66,90 - 3 * 12,84 = 28,39 \text{ (0,01 mm)} \quad (17.2)$$

Após a obtenção dos valores limites, esses devem ser verificados acerca dos que não estão dentro dos limites estabelecidos e, nesse caso, que devem ser excluídos da amostra. Na amostra estudada, um ponto do trecho ficou fora do limite. Após a exclusão desse ponto, deve-se realizar novamente os cálculos executar a verificação até que nenhum valor esteja fora dos limites estabelecidos.

$$D = \frac{\sum Di}{n} = \frac{1.498,64}{23} = 65,16 \text{ (0,01 mm)}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Di - D)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{2.115,60}{22}} = 9,81 \text{ (0,01 mm)}$$

$$\text{Limite 1} = D + Z * \sigma = 65,16 + 3 * 9,81 = 94,58 \text{ (0,01 mm)}$$

$$\text{Limite 2} = D - Z * \sigma = 65,16 - 3 * 9,81 = 35,74 \text{ (0,01 mm)}$$

Após a segunda verificação, nenhum valor ficou fora do limite calculado, desta forma, deve-se obter o coeficiente de variação (cv) com a Equação 18.

$$cv = \frac{\sigma}{D} = \frac{9,81}{65,16} = 0,15 \text{ (0,01 mm)} \quad (18)$$

Com isso, é determinado o valor da deflexão característica (Dc) utilizado a Equação 19.

$$Dc = D + \sigma = 65,16 + 9,81 = 74,97 \text{ (0,01 mm)} \quad (19)$$

Posteriormente, deve-se verificar o valor do fator de correção sazonal (Fs), de acordo com o tipo de solo e a estação do tempo na região, durante o período de coleta de dados. Utilizando os parâmetros expostos na Tabela 13, têm-se um valor de 1,1 para o fator de correção sazonal.

Tabela 13 - Fator de Correção Sazonal

Natureza do Sub-leito	Fator de Correção Sazonal - Fs	
	Estação Seca	Estação Chuvosa
Arenoso e Permeável	1,10 - 1,30	1,00
Argiloso e Sensível à Umidade	1,20 - 1,40	1,00

Fonte: Adaptado de (DNER, 1979).

Após a obtenção do fator de correção sazonal, obtém-se o valor da deflexão característica corrigida ou deflexão de projeto (D_p), utilizando a Equação 20.

$$D_p = D_c * F_s = 74,97 * 1,1 = 82,46 \text{ (0,01 mm)} \quad (20)$$

Após a obtenção da deflexão de projeto, deve-se verificar a deflexão admissível (D_{adm}) do revestimento, para verificação se o pavimento está com os valores de projeto adequado. O valor obtido deve ser menor que o valor da deflexão admissível. O valor da D_{adm} é obtido pela Equação 21, correspondendo a deflexões medidas com carga padrão de 8,2 toneladas por eixo e utilizando, de acordo com o DNIT, um número N de 10^7 levando em consideração a espessura do pavimento de 7,5 centímetros.

$$D_{adm} = \text{Log}^{-1}(3,01 - 0,176 * \text{log } 10^7) = 59,98 \text{ (0,01 mm)} \quad (21)$$

Para verificação da qualidade estrutural do pavimento e das medidas corretivas que o pavimento necessita, de acordo o Tabela 14, deve-se verificar também o valor do raio. O valor do raio para o trecho em análise é 318,36 metros.

Tabela 14 - Qualidade estrutural do pavimento

Hipótese	Dados Deflectométricos Obtidos	Qualidade Estrutural	Medidas Corretivas
I	$D_p \leq D_{adm}$ $R \geq 100$	BOA	Apenas Correções de Superfície
II	$D_p > D_{adm}$ $R \geq 100$	Se $D_p \leq 3 D_{adm}$ REGULAR	Reforço ou Reconstrução
		Se $D_p > 3 D_{adm}$ MÁ	Reforço ou Reconstrução
III	$D_p \leq D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR PARA MÁ	Reforço ou Reconstrução
IV	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$	MÁ	Reforço ou Reconstrução

Fonte: Adaptado de (DNER, 1979).

Com os resultados calculados o D_p maior de D_{adm} e o raio maior que 100, verifica-se que a qualidade estrutural do pavimento é regular e necessidade de reforço ou reconstrução do pavimento no trecho analisado.

Foi realizado a mesma análise para todos os demais segmentos do trecho e obteve-se os resultados presentes do Gráfico 2.

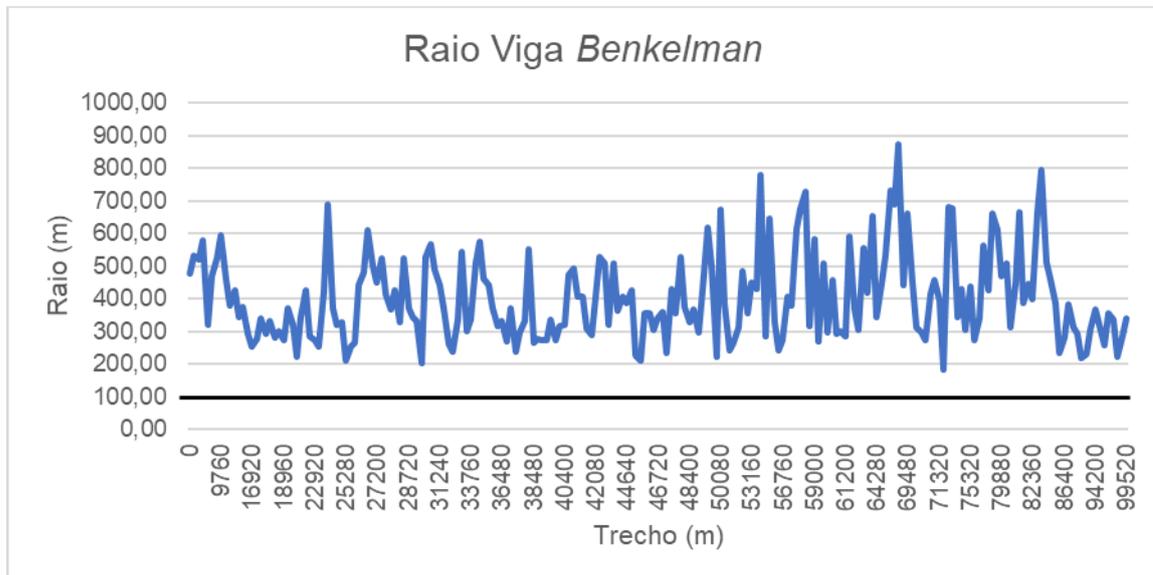
Gráfico 2 - Qualidade Estrutural



Fonte: (Autor, 2020).

Considerando apenas o raio como parâmetro para caracterização do pavimento, têm-se a necessidade de um raio maior que 100 metros. No trecho analisado foi possível verificar, como exposto no Gráfico 3, que todos os raios médios dos segmentos, utilizando os dados convertidos para Viga *Benkelman*, estão acima de 100 metros.

Gráfico 3 – Raio dos segmentos (Viga *Benkelman*)

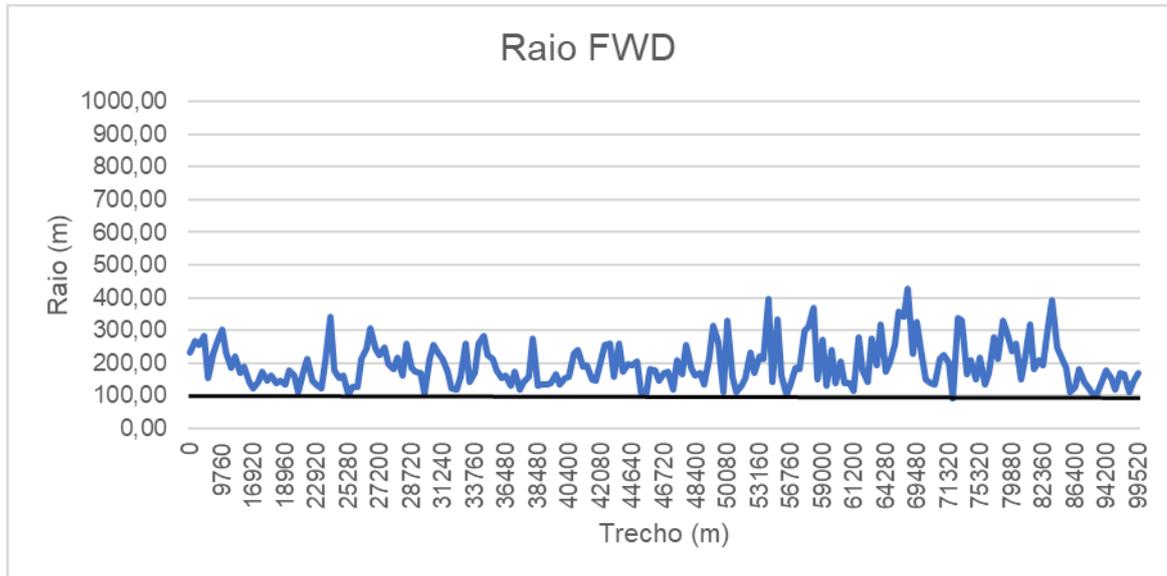


Fonte: (Autor, 2020).

Se for utilizado os dados obtidos através do equipamento FWD, pode-se verificar que, em sua maioria, seus valores são menores que o da Viga *Benkelman*, utilizando como parâmetro a Equação 12. Desta forma, têm-se apenas 1 valor menor

que 100 metros para os valores médios nos 100 quilômetros analisados. Esses dados podem ser visualizados no Gráfico 4.

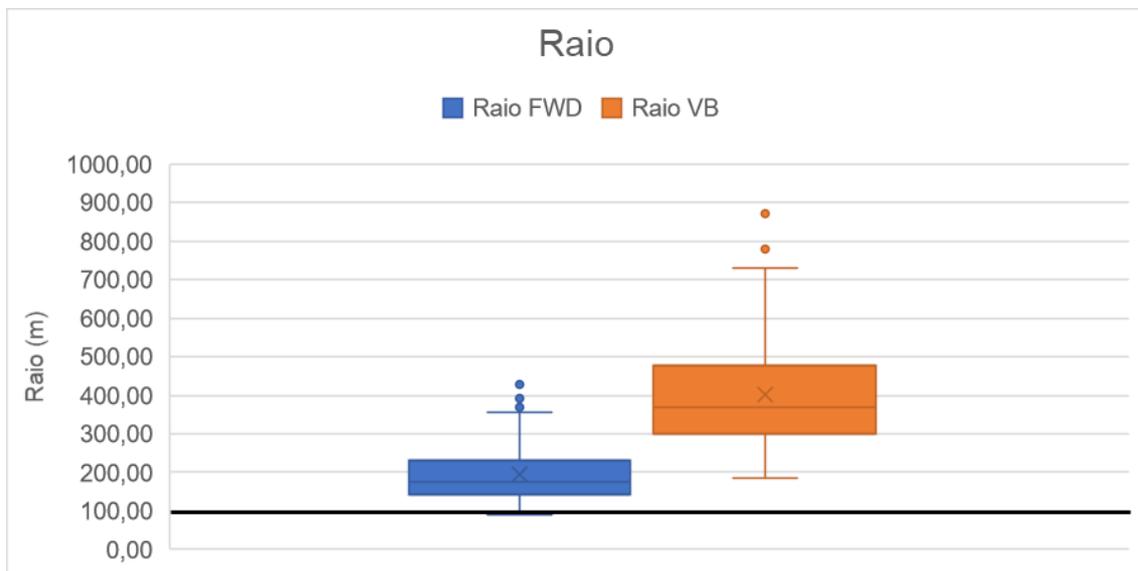
Gráfico 4 - Raio FWD



Fonte: (Autor, 2020).

Os Gráficos 3 e 4 mostram que, se analisados de forma isolada apenas os dados referentes ao raio em ambos os equipamentos, verifica-se que os trechos estão, em sua maioria, com valores aceitáveis, ou seja, acima de 100 metros, indicando um pavimento de boa qualidade estrutural, dados esses confirmados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Comparativo dos raios



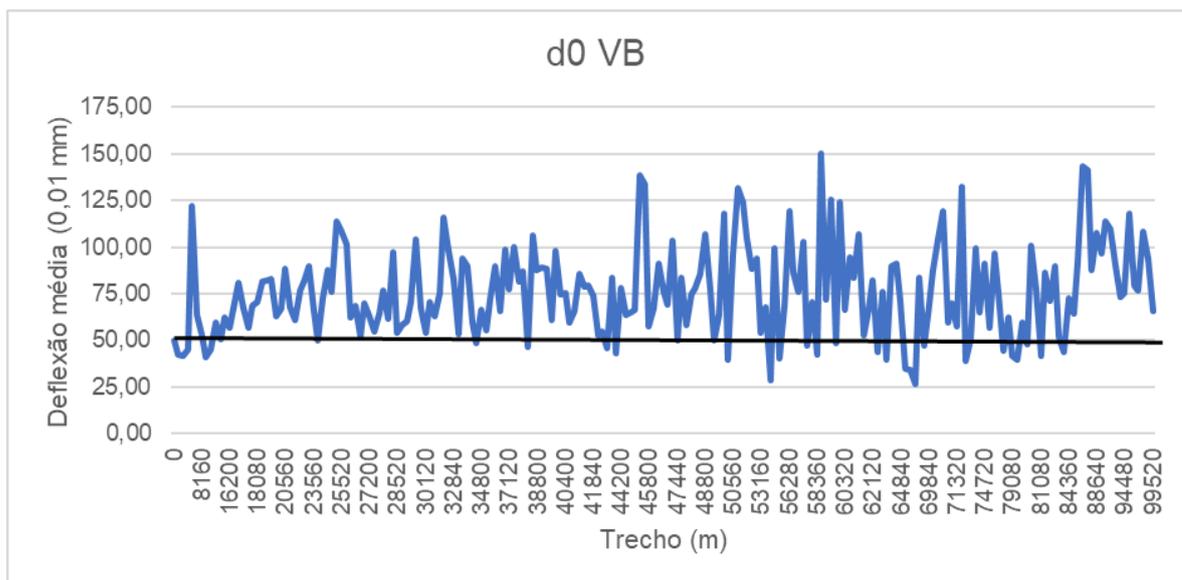
Fonte: (Autor, 2020).

No Gráfico 5, verifica-se um comparativo entre os valores dos raios obtidos através dos dois equipamentos. Os valores obtidos pelo equipamento FWD são

menores que os valores verificados através da conversão para a VB como já discutido anteriormente. É possível visualizar também outliers nos dados oriundos dos dois equipamentos.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), para um pavimento com revestimento de concreto asfáltico, o valor médio padrão para a deflexão (d_0) do pavimento é 50 (0,01 mm). Pode-se verificar no Gráfico 6, os valores de d_0 para a viga *Benkelman* estão, em sua maioria, acima do valor médio padrão de 50 (0,01 mm), dos 211 valores 181 estão acima desse valor.

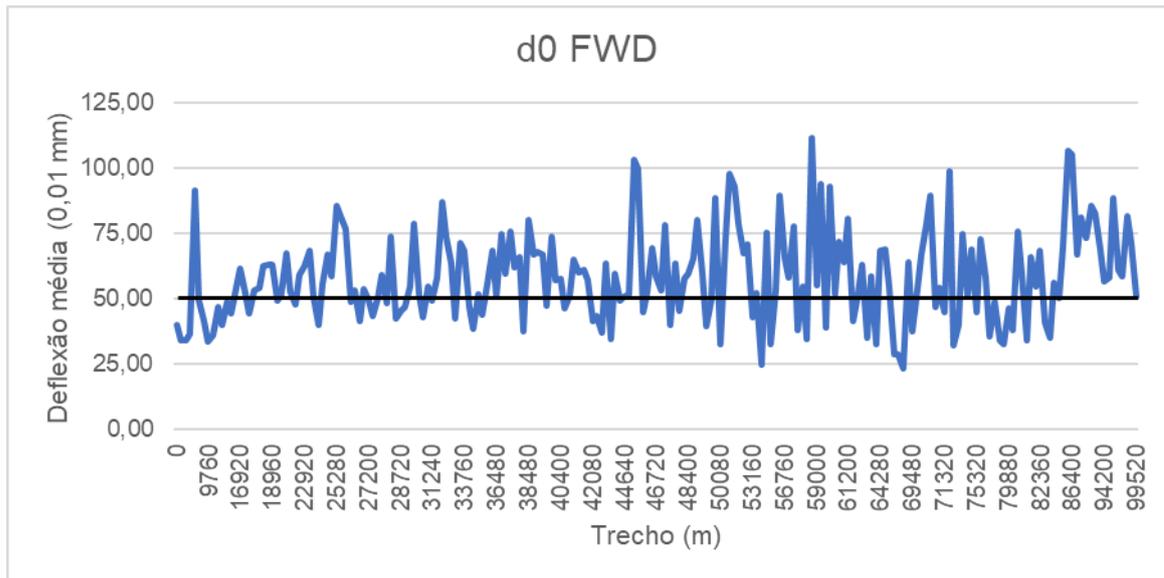
Gráfico 6 - Valores de d_0 para viga *Benkelman*



Fonte: (Autor, 2020).

Utilizando os valores obtidos através do FWD, pode-se verificar uma diminuição na quantidade de valores acima do valor padrão, em relação aos obtidos após a conversão para Viga *Benkelman*, os valores diminuíram dos 181 encontrados anteriormente para 140, valores demonstrados no Gráfico 7.

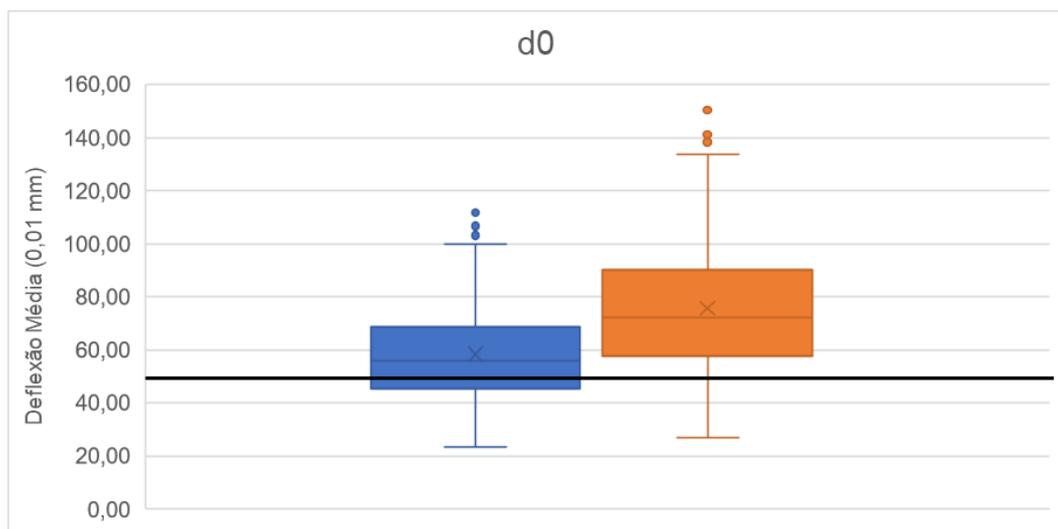
Gráfico 7 - Valores de d0 para FWD



Fonte: (Autor, 2020).

Tomando como base a análise isolada do d0, uma grande quantidade de trechos do pavimento demonstra um valor acima de 50 (0,01 mm), e com isso, acima do valor de referência, demonstrando assim, um pavimento sem uma boa qualidade de estrutural.

Gráfico 8 - Comparativo das deflexões



Fonte: (Autor, 2020).

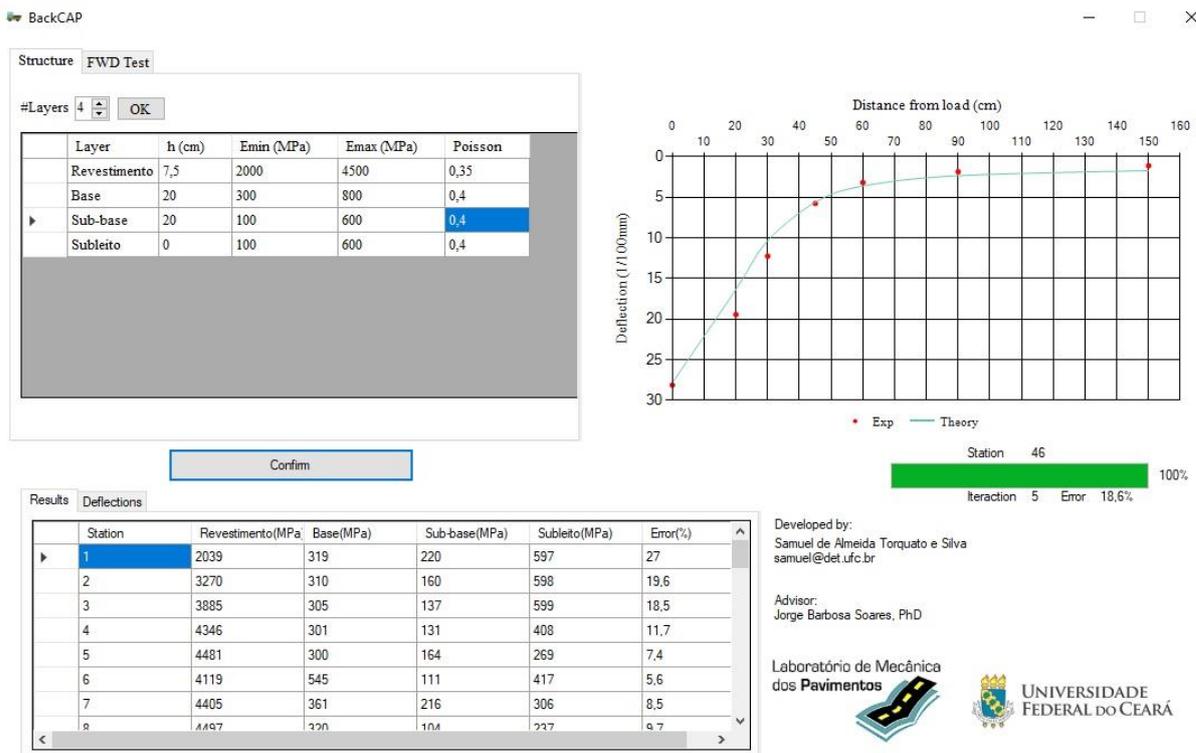
No Gráfico 8, pode-se visualizar um paralelo entre os valores das deflexões referente aos dois equipamentos. Os valores obtidos pelo equipamento FWD são menores que os valores verificados através da conversão para a VB como já discutido anteriormente. É possível visualizar também outliers nos dados oriundos dos dois equipamentos.

Confirmando Nóbrega (2003), todas as camadas do pavimento influenciam a deflexão (d_0) tanto quanto o raio, porém a maior parte das tensões são absorvidas pela camada de revestimento. Os valores elevados encontrados no pavimento têm como possíveis causas a existência de trincas ou panelas em seu revestimento ou, exercendo um menor impacto, características de deformação dos materiais utilizados nas camadas de base e sub-base. Porém, com a obtenção de valores altos também para o raio de curvatura, verifica-se uma boa qualidade de suporte do pavimento, na base e sub-base, embasando possíveis problemas no revestimento.

Outra análise realizada com os dados oriundos do equipamento FWD, foi a utilização de dois programas computacionais para verificação do módulo de resiliência através de retroanálise. Os programas utilizados foram o *BackCap* e *BackMedina*.

No *BackCap* é colocado a descrição da estrutura com os dados de MR mínimo e máximo, além da altura do pavimento e do coeficiente de *Poisson*, estipulado pelo próprio manual do programa e informado os dados referentes ao trecho de análise através de arquivo de texto. Na Figura 19 pode-se verificar a interface do *BackCap* após a realização da retroanálise e dos valores colocados para camada.

Figura 19 – Interface *BackCap*

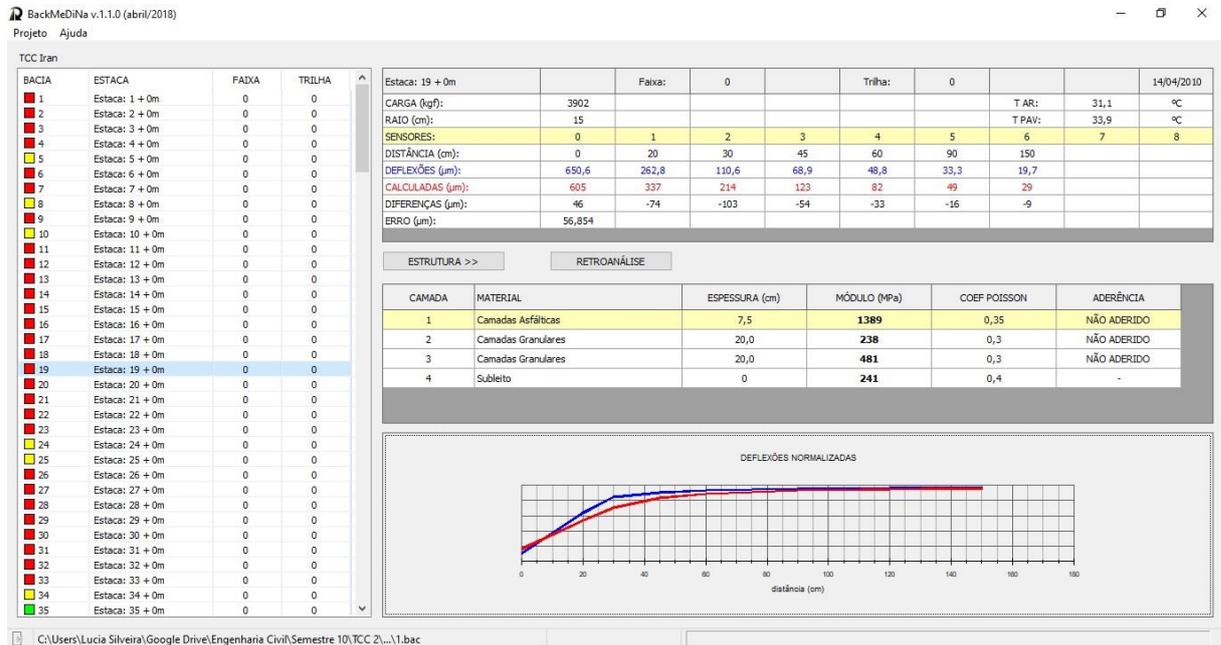


Fonte: (Autor, 2020).

No *BackMedina* é primeiramente informado os dados através de planilha com parâmetros de módulo de resiliência e coeficiente de *Poisson* pré-determinados

no manual do programa e com os valores da altura de camada do pavimento, posteriormente foi feita as alterações necessárias para que todos os pontos tivessem os mesmos dados para a estrutura do pavimento. Na Figura 20, verifica-se a interface do programa *BackMedina* após a realização da retroanálise.

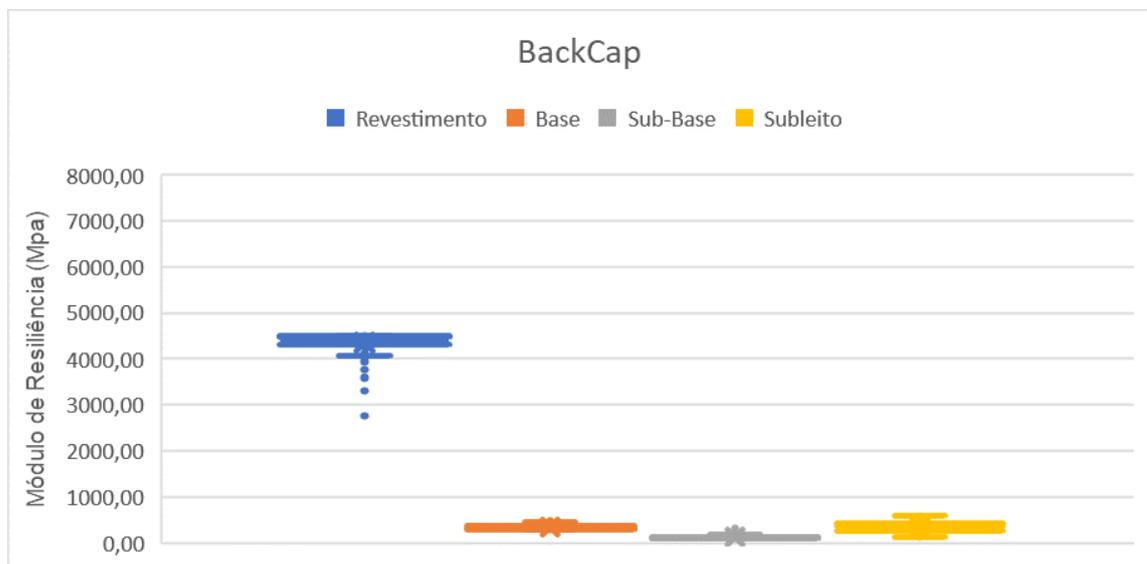
Figura 20 – Interface *BackMedina*



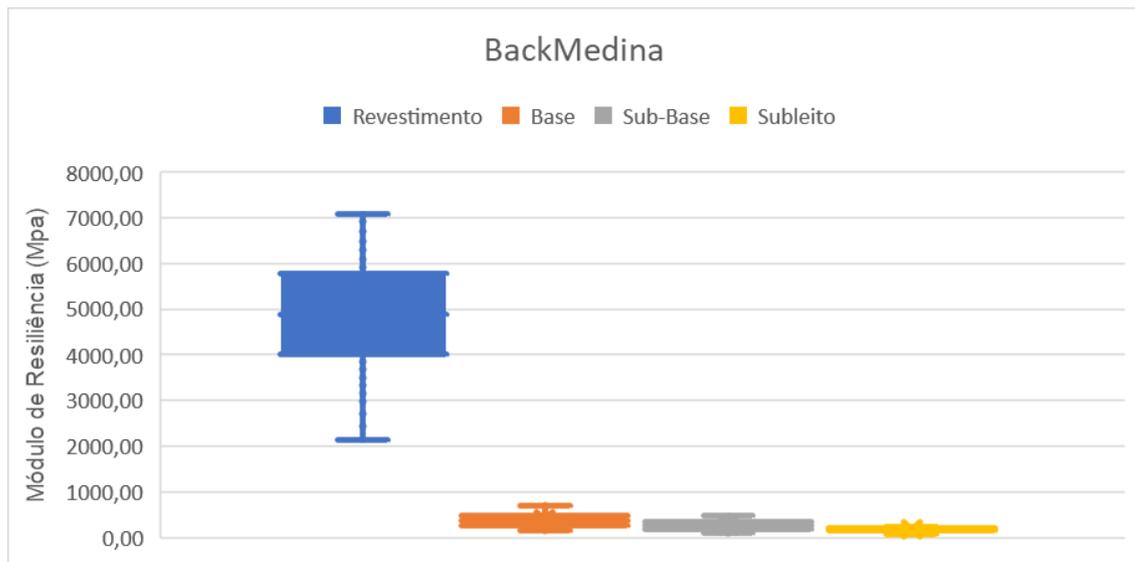
Fonte: (Autor, 2020).

Após a realização da retroanálise nos dois programas, foram obtidos os resultados expostos nos Gráficos 9 e 10, respectivamente.

Gráfico 9 - Valores do Módulo de Resiliência *BackCap*



Fonte: (Autor, 2020).

Gráfico 10 - Valores do Módulo de Resiliência *BackMedina*

Fonte: (Autor, 2020).

Realizando uma análise comparativa entre os resultados do módulo de resiliência, têm-se algumas diferenças observadas, diferenças essas que, teoricamente, não deveriam ser evidentes, corroborando com o fato de que os dados utilizados para as análises nos dois programas, foram os mesmos. Porém essa diferença nos resultados pode ser justificada pelo modo de concepção do programa *BackCAP*, que foi baseado apenas em dados de materiais e solos coletados no estado do Ceará. Como não foi possível obter a informação do tipo de material que compõe cada camada, utilizou-se os parâmetros contidos na Tabela 15, juntamente com os valores padrão para análise de cada camada do pavimento.

Tabela 15 – Valor Padrão do Módulo de Resiliência

Camada	Material Adotado	MR (Mpa)	
		Inferior	Superior
Revestimento	CBUQ	2500	4500
Base	Material Granular	250	450
Sub-Base	Material Granular	150	300
Subleito	Material Granular	100	200

Fonte: (DER/SP, 2006)

Para o primeiro programa, o *BackCap*, foi verificado uma concentração dos valores entre 4000 e 4500, valores comuns para um revestimento tipo CBUQ. Houve pouca variação entre os dados, haja vista que a caixa do *boxplot* não variou tanto quando a do *BackMedina*. Houve presença de outliers para valores do MR abaixo do padrão para um revestimento tipo CBUQ.

Realizando a análise dos valores de MR obtidos para as camadas granulares, verificou-se que, para a base, uma grande parte dos valores ficou dentro do intervalo padrão, aproximadamente 95%, porém, quando verificado os valores da sub-base, apenas aproximadamente 18% ficaram dentro do intervalo, sendo que dos valores fora do intervalo, apenas 4 dos 211 trechos estudados estão acima do intervalo, com aproximadamente 80% dos valores abaixo dos valores estipulados.

Um outro fator relevante verificado foi, o alto valor do MR para a camada de subleito, ficando acima do valor da sub-base e equivalente aos valores da base. Os valores obtidos para a camada de subleito, aproximadamente 5% ficaram dentro do intervalo padrão, com todos os demais valores tendo ficado acima do intervalo esperado. Para as camadas granulares, também foi verificado pouca alteração nos valores em relação ao valor estipulado inicialmente no programa.

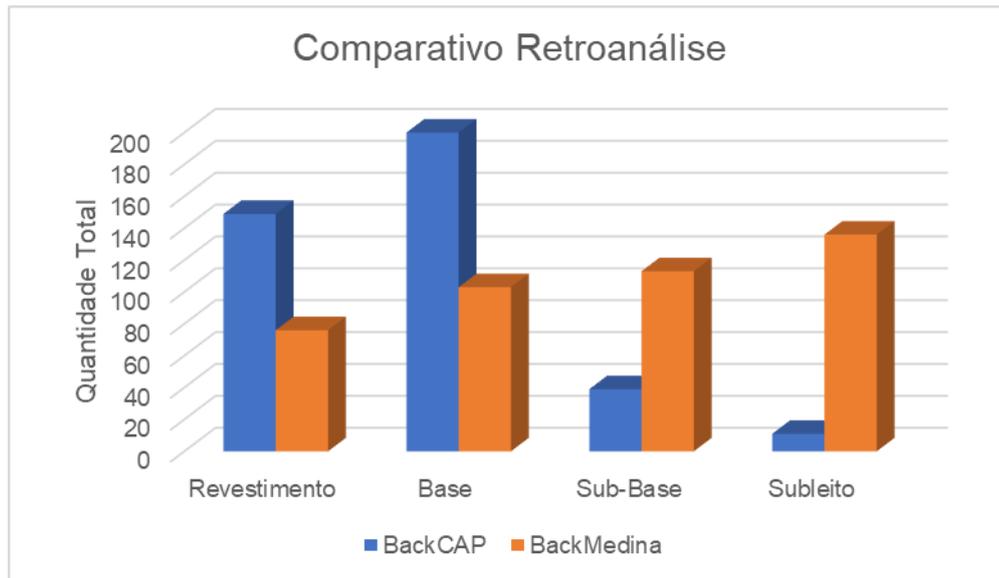
Para o programa *BackMedina*, foi possível verificar valores com maiores variações entre si para todas as camadas, sendo possível verificar várias *outlier*. Para o intervalo padrão, aproximadamente 36% dos valores estão dentro do intervalo. Em relação as *outlier*, foi verificado em alguns trechos do segmento que o revestimento obteve valores bem acima do valor base, como no maior valor encontrado, 7088 Mpa, entre os trechos do km 54 e do km 55, porém, em alguns trechos, foi verificado valores bem abaixo do valor base, como no menor valor encontrado, 2131,3 Mpa, entre os trechos do km 71 e do km 72.

Na análise das camadas granulares, iniciando pela camada de base, aproximadamente 50% dos valores obtidos estão dentro do intervalo base, um valor bem inferior a quantidade abaixo do valor base no outro programa. Para os valores de sub-base encontrados, pouco mais de 50% dos valores estavam dentro do intervalo, uma quantidade equivalente a porção de valores da base dentro do intervalo, um resultado diferente do encontrado no outro programa, onde houve discrepância entre os resultados obtidos para as camadas de base e sub-base.

Para o subleito, camada com a maior quantidade de valores fora do intervalo na análise realizada através do outro programa, pôde-se verificar que aproximadamente 65% dos valores obtidos estão dentro do intervalo.

No *BackMedina*, os percentuais obtidos para todas as camadas, tem valores mais aproximados, principalmente nos resultados para base e sub-base. É possível verificar um comparativo entre os resultados obtidos dos dois programas computacionais utilizados no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Comparativo da Retroanálise



Fonte: (Autor, 2020)

Para Medina e Motta (2015), ao se tratar do MR para as camadas granulares, o fator preponderante é o estado de tensão atuante sendo, tanto decorrente do peso próprio da camada, quanto das tensões oriundas dos veículos que trafegam sobre o pavimento. Já para o MR do revestimento, a carga atuante e o estado do pavimento, são os fatores preponderantes para os resultados.

Ao verificar os resultados obtidos, percebe-se que confirmam as conclusões retiradas da análise do DNER (1979) pois, os valores obtidos para revestimento, que tem uma maior influência vindas da existência, ou não, de trincas e panelas, foi mais baixo do que o valor verificado para as camadas granulares. Isso reforça a necessidade de correção dos pavimentos em grande parte do trecho objeto de estudo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após as análises, realizadas no pavimento, foi possível verificar que, em uma grande parte dos trechos analisado, primeiro a presente no DNER (1979) e a posteriormente a retroanálise dos programas computacionais, o pavimento encontra-se com condições inferior as necessárias para o tráfego solicitado.

Para a análise dos resultados pelo DNER (1979), pôde-se verificar que 90% dos trechos obteve-se valores fora do aceitável para aquele tipo de pavimento e para a necessidade de carga, nesse estudo utilizou-se o número N de 10^7 , para o trecho específico.

Em alguns trechos verificou-se resultados diferentes para algumas análises, como por exemplo no caso de, segundo os resultados do DNER (1979) um trecho do pavimento está regular e necessitando de correção, porém quando verificado os valores obtidos na retroanálise, esse mesmo trecho está dentro do padrão, conseqüentemente com uma boa qualidade, como por exemplo no trecho entre o Km 5,8 e Km 6,1, onde é indicado a necessidade de reforço na estrutura, e a retroanálise indica todos os valores dentro do intervalo, ou o inverso, no caso do trecho entre o Km 0 e o Km 0,8, onde é indicado um pavimento com boa qualidade com necessidade apenas de correções na superfície. Um fator que pode ter sido determinante para esse fato foi a equação de correlação utilizada, acarretando em uma alteração dos resultados.

A retroanálise encontrou valores fora do intervalo padrão, sendo em uma quantidade maior de trechos que na análise do DNER (1979). Verifica-se com isso que alguns locais podem estar no seu limite de qualidade para ser considerado um pavimento de boa qualidade estrutural, sendo necessário novas avaliações estruturais nesses trechos para adoção de medidas mais efetivas.

No que diz respeito aos programas utilizados, verificou-se uma dificuldade no programa *BackMedina* pela necessidade de forma manual cada análise, em cada ponto, aumenta de forma significativa o tempo necessário para realização do estudo e inviabilizando a utilização para grandes trechos ou para uma quantidade elevada de iterações no mesmo ponto.

Para o *BackCap*, um problema encontrado foi o resultado elevado para a camada de subleito e a pouca alteração nos valores após várias análises, esses resultados podem ter sido obtidos pelo fato do programa ter, em sua base de dados, informações apenas dos materiais e terrenos presentes no estado do Ceará.

Dessa forma, vale ressaltar que, deve-se continuar o aprimoramento dos *softwares* analisados de forma a obter resultados mais satisfatórios aumentando a base de dados dos programas, apesar de que para essa simulação muitos parâmetros foram estimados (volume de tráfego, espessura das camadas e constituição das camadas) o que pode ter influenciado significativamente nos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

AASHTO. *American Association of State Highway and Transportation Officials – Guide of Design of Pavement*, Washington, EUA, 1993.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA; L. M. G. D.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros, Rio de Janeiro, 2ª edição, 2010.

BORGES, C. B. S. Estudo Comparativo Entre Medidas De De Flexão Com Viga Benkelman E Fwd Em Pavimentos Da Malha Rodoviária Estadual De Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

COUTINHO, J. C. P. Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do dner com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho. Ouro Preto, 2011.

DER/SP. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo - IP-DE-P00/003: **Avaliação funcional e estrutural do pavimento**, São Paulo, 2006.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - 024/94 ME: **Determinação das deflexões pela Viga Benkelman - Método de Ensaio**, Brasília, 1994a.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - 011/79 PRO: **Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis**, Brasília, 1979.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - 175/94 PRO: **Aferição da Viga Benkelman - Procedimento**, Brasília, 1994b.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - 273/96 PRO: **Determinação de deflexões utilizando deflectômetros de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)" - Procedimento**, Brasília, 1996.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – 03/2003 PRO: **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento**, Brasília, 2003a.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – 05/2003 PRO: **Defeito nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia**, Brasília, 2003b.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – 09/2003 PRO: **Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento**, Brasília, 2003c.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – 132/2010 PRO: **Pavimentos - Calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)" - Procedimento**, Brasília, 2010.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – 134/2018 ME: **Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**, Brasília, 2018.

FONSECA, L. F. S. Análise das Soluções de Pavimentação do Programa CREMA 2ª ETAPA do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Dissertação de mestrado PEC/ COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de estudos e pesquisas para elaboração de método macanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. 2018.

GOOGLE. *Google Earth*. Version 7.3.2. 2018. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR_ALL/earth/versions/>. Acesso em: 13 nov. 2019.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos Pavimentos*. Editora: Interciência. 3ª edição, v.1, 2015.

MORAES, C. G. Análise de Bacias Deflectométricas Obtidas por 4 Equipamentos do Tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2015.

NÓBREGA, E.S. Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

PEREIRA, J. M. B. **Um procedimento de retroanálise para pavimentos flexíveis baseado na teoria do ponto inerte e em modelagem matemática**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PESQUISA CNT DE RODOVIAS 2019 - Relatório gerencial. **Brasília: CNT: SEST SENAT**, 2019.

PINTO, S. Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. *Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. Editora Copiarte, 2ª edição, 2010.

SEPLAN. Secretaria de Planejamento do Estado do Rio Grande do Norte: **Diagnóstico e planejamento estratégico para o desenvolvimento de atividades produtivas – Diagnóstico consolidado**, Natal, 2016.

SOUZA, G. D.; JATOBÁ, L. L. B.; LYRA, M. P. "Restauração X Conservação". In: 23a Reunião Anual de Pavimentação. v. 3, p. 1331-1362, Florianópolis, SC, Brasil, 1988.