

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC**

GIOVANI DEVITTE

**DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS URBA-
NOS: COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO NACIO-
NAL E O DNER PRO 269/94**

**Joinville
2021**

GIOVANI DEVITTE

DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS URBANOS: COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO NACIONAL E O DNER PRO 269/94

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de concentração: Engenharia Urbana e da Construção Civil.

Orientador: Prof. Dra. Adriana Goulart dos Santos

Joinville

2021

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Devitte, Giovani
DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS URBANOS: COMPARATIVO ENTRE O
MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO NACIONAL E O DNER
PRO 269/94 / Giovani Devitte. -- 2021.
165 p.

Orientador: Adriana Goulart dos Santos
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2021.

1. Avaliação Estrutural. 2. Defexão. 3. Pavimentos urbanos. 4.
Pavimentos flexíveis . 5. Método MeDiNa. I. Goulart dos Santos,
Adriana. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

GIOVANI DEVITTE

DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS URBANOS: COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO NACIONAL E O DNER PRO 269/94

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de concentração: Engenharia Urbana e da Construção Civil.

Banca Examinadora

Prof. Dra. Adriana Goulart dos Santos
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Prof. Dr. Romualdo Theophanes de França Junior
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dra. Heliana Barbosa Fontenele
Universidade Estadual de Londrina

Joinville, 30 de julho de 2021.

À minha querida e saudosa sogra,
Maria Icelda Nobrega.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha vida e saúde.

À professora Dra. Adriana Goulart dos Santos, que com compreensão e paciência me orientou neste trabalho.

Aos professores do programa de pós-graduação, em especial aos doutores Edgar Odebrecht, Romualdo Theophanes de França Junior e Heliana Barbosa Fontenele pela dedicação, conselhos e participação em minha banca examinadora.

Ao Engenheiro Civil e Dr. Ramon Knabben, pela parceria, consultoria e conhecimento compartilhado.

À minha amada esposa Daniela, e as minhas lindas filhas Valentina e Manuela, pelo amor, conforto e compreensão transmitidos nas intermináveis horas junto ao computador.

Aos meus pais Terezinha e Irno Roque Devitte, pelos investimentos e esforços dedicados à minha educação.

Ao meu cunhado Roberto e à minha irmã, mestre e doutoranda Alessandra, pelas palavras de incentivo e por compartilhar seu conhecimento do mundo acadêmico.

Aos meus colegas Ana Claudia Boettcher, Fernanda Klafke e Francisco Hackbarth, que estiveram juntos nesta caminhada.

Aos mestres Claudia C. Z. Nery e Paulo Rodrigues pelas dicas, materiais de apoio e experiências trocadas ao longo deste trabalho.

Às empresas Geoforma e RoadRunner Engenharia pelo empréstimo dos seus equipamentos para a realização da parte experimental de minha pesquisa.

Aos meus amigos que torceram e me apoiaram, mesmo com minhas faltas e ausências.

E a todos meus colegas de trabalho, que contribuíram positivamente me permitindo realizar este estudo, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A infraestrutura viária urbana é um equipamento fundamental para o desenvolvimento econômico local, além de aumentar a qualidade de vida da população e melhorar a mobilidade urbana, estando presente direta e indiretamente em todas as suas atividades diárias. Logo, é preciso que a mesma se encontre em boas condições para atender as demandas do tráfego. Uma das formas de garantir a qualidade das estruturas do pavimento e evitar a sua degradação precoce é realizar uma avaliação da capacidade estrutural para posterior estimativa de sua via útil. Neste contexto, esse trabalho teve como principal objetivo realizar o comparativo de dimensionamento de reforço de quatro pavimentos asfálticos na cidade de Joinville-SC realizado pelo Método mecanístico-empírico (MeDiNa) e pela Metodologia do DNER PRO 269/94. Para isso, foram realizados os levantamentos deflectométricos através do FWD e determinados os valores dos módulos equivalentes retroanalisados de cada camada do pavimento das ruas avaliadas utilizando o programa BackMeDiNa. Ainda, foram realizados os levantamentos deflectométricos com o equipamento LWD em pontos coincidentes nas mesmas ruas. Fez-se uma análise comparativa dos valores de deflexão aferidas com o LWD com aquelas aferidas pelo FWD. A partir destas medidas deflectométricas foi feito o dimensionamento das espessuras de reforço do revestimento asfáltico pelo *software* MeDiNa e pelo DNER PRO 269/94 para as ruas analisadas na pesquisa. Os resultados mostraram que pelo fato de serem levadas em consideração as características de rigidez do material e da fadiga do revestimento asfáltico, é possível assegurar que o dimensionamento realizado por uma análise mecanística-empírica tende à uma predição mais assertiva da vida útil do pavimento. Além disso, quando se apresentam valores de tráfego elevado, a utilização do Método DNER PRO 269/94 poderá levar à redução da vida útil de projeto.

Palavras-chave: Avaliação Estrutural. Deflexão. Pavimentos urbanos. Método MeDiNa.

ABSTRACT

Urban road infrastructure is of device importance for local economic development, by increasing the people's quality of life and improving urban mobility, it has been directly and indirectly present in daily activities. Therefore, it must be in good conditions to attend the demands of traffic. One of the ways to ensure the quality of pavement structures and prevent early degradation is first to evaluate the structural capacity and then, to estimate the useful way. In this context, this work had as main objective to make the comparison of reinforcement sizing of four asphalt pavements in the city of Joinville-SC executed by the mechanistic-empirical method (MeDiNa) and by the DNER PRO 269/94 Methodology. For this purpose, deflectometric surveys were create using the FWD. To obtain the values of the equivalent retro-analyzed modules of each layer of the pavement of the verified streets it was determined used the BackMeDiNa program. Also, the deflectometric surveys were made by the LWD equipment at coincident points on the same streets. A comparative analysis was made of the deflection values measured by the LWD with those measured by the FWD. From these deflectometric measurements, the dimensioning of the reinforcement thicknesses of the asphalt coating was made by the MeDiNa software and by the DNER PRO 269/94 for the streets analyzed in the research. The results showed as the material stiffness and fatigue characteristics of the asphalt coating, it is possible to guarantee that the design performed by a mechanistic-empirical analysis tends to a more assertive prediction of the pavement's useful life. Furthermore, when there are high traffic values, the use of the DNER PRO 269/94 Method may lead to a reduction in the project's useful life.

Keywords: Structural Assessment. Deflection. Urban pavements. Medina method.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos defeitos – Codificação e classificação (Anexo A da Norma DNIT 005/2003-TER).....	30
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tensões atuantes na estrutura de um pavimento flexível	22
Figura 2 - Carregamento circular assimétrico num sistema de duas camadas	24
Figura 3 - Ciclo de vida de uma estrutura de pavimento.....	26
Figura 4 - Desempenho do pavimento ao longo de seu ciclo de vida	27
Figura 5 - Esquema representativo de irregularidade de um pavimento asfáltico.....	31
Figura 6 - Faixas de variação do IRI para diferentes tipos de pavimentos e velocidades de circulação do tráfego	32
Figura 7 - Representação da região do pavimento submetida aos esforços das cargas do tráfego	33
Figura 8 - Ilustração da bacia deflectométrica.....	34
Figura 9 - Representação gráfica da bacia deflectométrica e os respectivos índices de curvatura	35
Figura 10 - Exemplos de extração de um corpo de prova do pavimento asfáltico.....	44
Figura 11 - Exemplo de DCP de avaliação estrutural expedita de subleitos e camadas de solo	45
Figura 12 - Constituição de um tipo de equipamento LWD.....	48
Figura 13 - Princípio de funcionamento do FWD	50
Figura 14 - Equipamento FWD em seu trailer sendo rebocado por um veículo de apoio e detalhe da parte do sistema de pesos para aplicação das cargas por impacto	52
Figura 15 - Detalhes da placa e gráficos da bacia de deformação com o FWD.....	53
Figura 16 - Esquema do modelo físico das quatro células (em metros).....	54
Figura 17 - Medidas divergentes de deflexões entre os pontos 01 e 04	56
Figura 18 - Equipamentos FWD e LWD e pista de teste em escala real.....	57
Figura 19 - Módulos de elasticidade do LWD e FWD para a linha C	58
Figura 20 - Regressão linear entre LFWD x Viga Benkelman para os trechos 2 e 4.....	62
Figura 21 - Comparativo entre deflexões médias com LWD, FWD e Viga Benkelman	62
Figura 22 - Exemplo de uma tela do software de retroanálise BackMeDiNa	68
Figura 23 - Dados do tráfego	69
Figura 24 - Análise realizada pelo software para a estrutura proposta.....	72
Figura 25 - Exemplo de alerta mostrado pelo software MeDiNa.....	73
Figura 26 - Estrutura de referência	77

Figura 27 - Fluxograma – Etapas da pesquisa	85
Figura 28 - Mapa de localização e bairros do município de Joinville.....	86
Figura 29 - Localização das ruas nos bairros de Joinville.....	88
Figura 30 - Perfil da estrutura da Rua 01.....	89
Figura 31 - Perfil da estrutura da Rua 02.....	90
Figura 32 - Perfil da estrutura da Rua 03.....	90
Figura 33 - Perfil da estrutura da Rua 04.....	91
Figura 34 - Imagens da demarcação e georreferenciamento das estações de teste	92
Figura 35 - Medição com o LWD na Rua 1	94
Figura 36 - Imagens do levantamento com LWD na Rua 4	95
Figura 37 - Veículo de medição e carros de apoio para a sinalização no levantamento realizado na Rua 4	97
Figura 38 Imagens do levantamento com FWD	97
Figura 39 - Representação do BackMeDiNa das bacias obtidas com o FWD para a Rua 01	100
Figura 40 - Defeitos existentes na Rua 2	103
Figura 41 - Defeitos existentes na Rua 4	104
Figura 42 - Diagramas de caixa para as medidas de deflexão realizadas com o FWD e o LWD na Rua 2	105
Figura 43 - Diagramas de caixa para as medidas de deflexão realizadas com o FWD e o LWD na Rua 4	105
Figura 44 - Comparativo entre valores médios dos módulos equivalentes	119
Figura 45 - Dimensionamento pelo Método MeDiNa da Rua 01	123
Figura 46 - Dimensionamento pelo Método MeDiNa da Rua 02	123
Figura 47 - Dimensionamento pelo Método MeDiNa da Rua 03	124
Figura 48 - Dimensionamento pelo Método MeDiNa da Rua 04	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos para o coeficiente de Poisson	41
Tabela 2 - Resultados da correlação entre LWD e FWD	54
Tabela 3 - Deflexões obtidas pelo LWD para a célula 2 (revestimento asfáltico de 11 cm) da Figura 16.....	55
Tabela 4 - Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 2 (revestimento asfáltico de 11 cm) da Figura 16.....	55
Tabela 5 - Resumo das configurações dos testes com o LWD.....	59
Tabela 6 - Resumo dos resultados do teste com o LWD.....	60
Tabela 7 - Estruturas selecionadas e estações de ensaio	60
Tabela 8 - Resultados das deflexões obtidas com Viga Benkelman, placa e LFWD para o segmento 3 (Rua Piratuba)	61
Tabela 9 - Grau de confiabilidade e critérios de parada do dimensionamento.....	70
Tabela 10 - Características das misturas asfálticas teóricas: classe 1 a 4.....	71
Tabela 11 - Considerações para uso de camada aderida	71
Tabela 12 - Classificação dos solos finos quanto à resiliência.....	75
Tabela 13 - Valores de I1e I2	77
Tabela 14 - Valores dos módulos obtidos na retroanálise	79
Tabela 15 - Resultados obtidos no dimensionamento do reforço de todos os segmentos homogêneos	79
Tabela 16 - Resultados do dimensionamento dos segmentos 02, 04, 06 e 08 com camada antirreflexão de trincas	80
Tabela 17 - Etapas do estudo	80
Tabela 18 - Perfil estrutural dos segmentos avaliados neste estudo: (a) segmento 1, (b) segmento 2, (c) segmento 3, e (d) segmento 4	81
Tabela 19 - Dados do levantamento de campo: deflectometria, irregularidade (IRI) e área trincada	81
Tabela 20 - Resultados do projeto de reforço pelos procedimentos PRO 11 e PRO 269	82
Tabela 21 - Resultados do projeto de reforço pelo MeDiNa.....	82
Tabela 22 - Previsão da espessura de reforço segundo o Método MeDiNa	83
Tabela 23 - Numeração e caracterização das ruas estudadas	88
Tabela 24 - Preenchimento da planilha em Excel da Rua 01 do arquivo de bacias para os	

dados do FWD.....	99
Tabela 25 - Número N das ruas avaliadas	101
Tabela 26 - Resultados das deflexões obtidas com LWD e FWD.....	106
Tabela 27 - Comparativo entre as medidas de deflexões médias: LWD versus FWD.....	107
Tabela 28 - Valores de correlação pelo coeficiente de Pearson entre LWD e FWD	111
Tabela 29 - Valores de correlação pelo coeficiente de Pearson entre LWD (Dissertação <i>versus</i> Rodrigues)	115
Tabela 30 - Valores médios dos módulos equivalentes retroanalisados a partir do FWD (Rua 01).....	116
Tabela 31 - Valores médios dos módulos equivalentes retroanalisados a partir do FWD (Rua 02).....	117
Tabela 32 - Valores médios dos módulos equivalentes retroanalisados a partir do FWD (Rua 03).....	117
Tabela 33 - Valores médios dos módulos equivalentes retroanalisados a partir do FWD (Rua 04).....	118
Tabela 34 - Resumo dos resultados dos módulos retroanalisados.....	118
Tabela 35 - Classificação dos solos das ruas pesquisadas.....	120
Tabela 36 - Dimensionamento de espessuras de reforço (FWD x LWD)	121
Tabela 37 - Espessuras de Reforço para o Método Medina e PRO 269/94.....	124
Tabela 38 - Vida útil do pavimento	126

LISTA DE GRÁFICOS

Gráficos 1 - Gráficos das medidas deflectométricas do LWD e FWD para a Rua 1	108
Gráficos 2 - Gráficos das medidas deflectométricas do LWD e FWD para a Rua 2	109
Gráficos 3 - Gráficos das medidas deflectométricas do LWD e FWD para a Rua 3	109
Gráficos 4 - Gráficos das medidas deflectométricas do LWD e FWD para a Rua 4	110
Gráficos 5 - Gráficos de regressão linear entre medidas de deflexão do LWD x FWD para as Ruas 1 e 2	111
Gráficos 6 - Gráficos de regressão linear entre medidas de deflexão do LWD x FWD para as Ruas 3 e 4	111
Gráficos 7 - Comparativo entre medidas deflectométricas do LWD (Dissertação versus Rodrigues)	113
Gráficos 8 - Comparativo entre medidas deflectométricas do LWD (Dissertação versus Rodrigues)	113
Gráficos 9 - Comparativo entre medidas deflectométricas do LWD (Dissertação versus Rodrigues)	114
Gráficos 10 - Comparativo entre medidas deflectométricas do LWD (Dissertação versus Rodrigues)	114
Gráfico 11 - Gráficos de regressão linear do LWD da pesquisa versus Rodrigues (2018) para a Rua 2	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPv	Associação Brasileira de Pavimentação
BGS	Brita graduada simples
BGTC	Brita graduada tratada com cimento
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CBR	Índice Suporte Califórnia
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DEINFRA	Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FWD	Falling Weight Deflectometer
GPR	Ground Penetration Radar
GPS	Global Positioning System
HDM	Highways Design and Maintenance Standards Mode
IRI	Índice de irregularidade longitudinal
KN	Quilo Newton
LWD	Level Weight Deflectometer
LFWD	Level Falling Weight Deflectometer
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NDT	Ensaios não destrutivos
PMF	Pré-misturado a frio
PMQ	Pré-misturado usinado a quente
SEPUD	Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento
VMD	Volume médio diário
°C	Grau Celsius
v	Coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. JUSTIFICATIVA	18
1.2. Objetivos	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1. O PAVIMENTO ASFÁLTICO	21
2.1.1. Definições.....	21
2.1.2. Análise de tensões em pavimento flexível	21
2.2. MANUTENÇÃO VIÁRIA	24
2.2.1. Definições.....	24
2.2.2. Processo de degradação dos pavimentos asfálticos.....	26
2.2.3. Avaliação dos pavimentos asfálticos.....	27
2.3. AVALIAÇÃO FUNCIONAL DO PAVIMENTO	28
2.3.1. Defeitos da superfície de rolamento	29
2.3.2. Irregularidade longitudinal	30
2.4. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO	32
2.4.1. Deformabilidade do Pavimento Asfáltico	32
2.4.2. Parâmetros das Bacias Deflectométricas	34
2.4.2.1. Raio de Curvatura.....	35
2.4.2.2. Índice de Curvatura da Superfície (SCI).....	36
2.4.2.3. Índice de Danos na Base (BDI).....	36
2.4.2.4. Índice de Curvatura da Base (BCI)	37
2.4.3. Fatores que Influenciam nos Valores de Deflexão	37
2.4.3.1. Efeitos Sazonais da Umidade.....	37
2.4.3.2. Temperatura	38
2.4.3.3. Carregamento	39
2.4.3.4. Posicionamento dos sensores	39
2.4.4. Módulo Resiliente e o Coeficiente de Poisson	40
2.4.5. Determinação do módulo de elasticidade por retroanálise.....	42
2.4.6. Métodos de avaliação estrutural do pavimento	43
2.4.6.1. Método Destrutivo.....	43
2.4.6.2. Método Semidestrutivo	44
2.4.6.3. Método Não Destrutivo	45
2.4.7. Equipamentos para medida das deflexões	45
2.4.7.1. <i>Light Weight Deflectometer</i> ou Deflectômetro de Impacto Leve (LWD)...	46

2.4.7.2. <i>Falling Weight Deflectometer</i> ou Deflectômetro de Impacto (FWD).....	49
2.4.8. Estudos comparativos com equipamentos não destrutivos	54
2.4.9. Dimensionamento da camada de reforço do pavimento asfáltico	63
2.4.10. Método MeDiNa.....	65
2.4.10.1. Funções de Transferência	66
2.4.10.2. Retroanálise com o <i>Software BackMeDiNa</i>	67
2.4.10.3. Estrutura do Pavimento, Composição do Tráfego e Curvas de Fadiga	69
2.4.10.4. Modo Reforço	72
2.4.11. DNER – PRO 269/94	74
2.4.12. Estudos comparativos de dimensionamento de camadas de reforço	78
3. DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO	85
3.1. ETAPA 01 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	85
3.1.1. Joinville – Dados geográficos.....	85
3.1.2. Composição dos pavimentos asfálticos de Joinville.....	86
3.1.3. Caracterização dos objetos de pesquisa.....	87
3.2. ETAPA 02 – AVALIAÇÃO ESTRUTURAL.....	91
3.2.1. Locação das estações de teste	91
3.2.2. Levantamento deflectométrico	93
3.2.2.1. Medição de deflexões com o LWD.....	93
3.2.2.2. Medição de deflexões com o FWD	95
3.2.3. Análise dos resultados dos levantamentos deflectométricos	98
3.2.3.1. Análise de correlação e de regressão linear entre medidas de FWD <i>versus</i> LWD.....	98
3.2.3.1.1. Comparação entre as medidas de deflexões aferidas por Rodrigues (2018) e por este estudo	98
3.3. ETAPA 03 – RETROANÁLISE DOS MÓDULOS EQUIVALENTES PELO SOFTWARE BACKMEDINA	98
3.3.1. Determinação dos módulos de elasticidade das camadas dos pavimentos.....	98
3.4. ETAPA 04 – Análise da vida útil dos pavimentos	100
3.4.1. Número N para o novo período de projeto	100
3.4.1.1. Método MeDiNa para o projeto de reforço	101
3.4.1.2. Método DNER – PRO 269/94 para o projeto de reforço	101
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	103
4.1. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL.....	103
4.1.1. Avaliação Geral das Ruas.....	103
4.1.2. Levantamento Deflectométrico	104
4.1.3. Análise de correlações e de regressão linear entre as medidas de deflexões ..	110
4.1.4. Evolução das deflexões no pavimento.....	112

4.2. Determinação dos VALORES DOS módulos EQUIVALENTES RETROANALISADOS	116
4.3. Análise da vida útil dos pavimentos	120
4.3.1. Espessura de Reforço (FWD x LWD).....	120
4.3.2. Análise Mecanística-Empírica (Método MeDiNa).....	122
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
APÊNDICE A – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TESTES	134
APÊNDICE B – RUA 01 - OTTO BOEHM	135
APÊNDICE C – RUA 02 - SÃO BORJA	136
APÊNDICE D – RUA 03 - PIRATUBA.....	137
APÊNDICE E – RUA 04 - AV. SANTOS DUMONT	138
APÊNDICE F – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO LWD	139
APÊNDICE G - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO FWD.....	140
APÊNDICE H – REGRESSÃO LINEAR DAS MEDIDAS DEFLECTOMÉTRICAS DO LWD (DISSERTAÇÃO <i>VERSUS</i> RODRIGUES (2018)	141
APÊNDICE I - CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA DO FWD – POR RUA	143
APÊNDICE J - CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA DO FWD – DEFLEXÃO E RAIO DE CURVATURA	144
APÊNDICE K – RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD/RUA01	145
APÊNDICE L – RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD/RUA02	146
APÊNDICE M – RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD/RUA03	147
APÊNDICE N – RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD/RUA04	148
APÊNDICE O: DIMENSIONAMENTO DE ESPESSURAS DE REFORÇO PELO MÉTODO MEDINA – RUA 1 (OTTO BOHEM).....	149
APÊNDICE P: DIMENSIONAMENTO DE ESPESSURAS DE REFORÇO PELO MÉTODO MEDINA – RUA 2 (SÃO BORJA)	152
APÊNDICE Q: DIMENSIONAMENTO DE ESPESSURAS DE REFORÇO PELO MÉTODO MEDINA – RUA 3 (PIRATUBA)	155
APÊNDICE R: DIMENSIONAMENTO DE ESPESSURAS DE REFORÇO PELO MÉTODO MEDINA – RUA 4 (AV. SANTOS DUMONT).....	158
ANEXO A – NÚMERO “N”– RUA 01 E 03 – RUA OTTO BOHEM E PIRATUBA.....	162
ANEXO B – NÚMERO “N”– RUA 02 – RUA SÃO BORJA	163
ANEXO C – NÚMERO. “N” E TIPO DE SOLO DO SUBLEITO – RUA 04 - AV. SANTOS DUMONT	164

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2019), o desenvolvimento pleno e sustentável de um país está diretamente ligado à sua infraestrutura de transporte, que tem a capacidade de mover uma nação, conectar pessoas e lugares e impulsionar a economia.

Para Migliaccio *et al.* (2014), a infraestrutura de transporte, além de receber um dos maiores investimentos em capitais de um governo, proporciona à sociedade os meios para satisfazer a demanda por produtos e serviços, possibilitando que as pessoas se aproximem e percam menos tempo em locomoção. Segundo os autores, as agências de transporte governamental administram esse capital e usam as informações sobre suas condições de trafegabilidade para decidirem o cronograma de obras e o tipo de manutenção, preventiva ou corretiva, a serem realizadas.

Já a infraestrutura viária urbana é de suma importância para o desenvolvimento econômico local, além de aumentar a qualidade de vida da população e melhorar a mobilidade urbana, estando presente direta e indiretamente em todas as suas atividades diárias. Logo, é preciso que a mesma se encontre em condições adequadas para atender as demandas do tráfego (MIGLIACCIO *et al.*, 2014).

Para Souza Junior (2018), qualquer interrupção ou redução na intensidade ou na frequência dos serviços necessários à manutenção desse patrimônio implica em aumentos substanciais nos custos de operação dos veículos e na necessidade de investimentos cada vez mais vultosos para sua recuperação.

De acordo com o Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT (IPR-745, 2011), a gerência de pavimentos constitui-se em uma importante ferramenta de administração para determinar a forma mais eficaz da aplicação dos recursos disponíveis, em diversos níveis de intervenção, de sorte a responder às necessidades dos usuários dentro de um plano estratégico que garanta a melhor relação custo *versus* benefício.

De acordo com Mendes *et al.* (2006), tradicionalmente, a gerência de pavimentos urbanos tem sido baseada na experiência acumulada dos engenheiros municipais, que muitas vezes tomam as decisões de manutenção e reabilitação sem utilizar procedimentos formais de gerência, seja por falta de recursos ou por desconhecimento do sistema.

Além disso, ainda de acordo com Mendes *et al.* (2006), a falta de informação ou até mesmo o receio de aderir à novas tecnologias faz com que, em muitos casos, as decisões quanto às medidas corretivas do pavimento sejam tomadas da mesma forma por muitos anos. Nem sempre mudanças de atitude ou de técnica são necessárias, mas, às vezes, é preciso

adotar tecnologias e procedimentos mais adequados para tratar os problemas atuais enfrentados nas cidades, beneficiando a conservação da infraestrutura urbana e minimizando outro problema que as administrações públicas enfrentam, que é a falta de recursos financeiros.

Conforme Luz (2017), dentre esses procedimentos de gerência de pavimentos estão as avaliações funcionais e estruturais dos pavimentos.

Conforme Rodrigues; Santos e Odebrecht (2019), a avaliação das condições dos pavimentos, ao longo do tempo de serviço, é essencial. Para isso, segundo os autores, é necessário não só avaliar o seu desempenho quanto ao aspecto funcional, que se relaciona à apreciação da superfície do pavimento quanto ao conforto ao rolamento, mas também o quanto ao aspecto estrutural, o qual vai caracterizar a perda de capacidade de suporte, acarretando em uma significativa redução de sua vida útil.

De acordo com Magalhães (2015), a avaliação estrutural do pavimento consiste em analisar sua capacidade de carga e é obtida com base em vários parâmetros, tal como a deflexão, que por sua vez permite determinar o módulo de elasticidade dos materiais que compõem as camadas do pavimento através do procedimento de retroanálise.

Para Moraes (2015), com o progresso da avaliação estrutural de pavimentos foram criadas várias técnicas e equipamentos de ensaios não destrutivos (NDT), cada qual com suas peculiaridades. Dentre estes equipamentos, pode-se citar o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e o *Light Weight Deflectometer* (LWD), os quais permitem o controle de qualidade dos serviços de pavimentação, desde a construção até a sua restauração.

1.1. JUSTIFICATIVA

É crescente o número de pesquisas para o aperfeiçoamento dos processos de avaliação estrutural dos pavimentos e para o aumento da eficácia no dimensionamento de seu reforço estrutural, em especial a partir de uma abordagem mecanística-empírica. A maioria das pesquisas faz uso da deformabilidade elástica, sendo que a capacidade estrutural do pavimento é avaliada segundo tensões e deformações geradas em seu interior a partir da solicitação por cargas exteriores (GOMES, 2012).

Segundo Albernaz (1997), equipamentos do tipo FWD, a partir da década de 80, experimentaram um crescimento de sua aplicação em virtude da quantidade de informações que podem ser obtidas em uma única campanha devido à sua elevada produtividade. Segundo o autor, outro fator importante relacionado ao FWD é que ele proporciona leituras de

deflexões de forma rápida e acurada, através de um sistema de aquisição de dados automáticos.

De acordo com Moraes (2015), a introdução no Brasil de um deflectômetro FWD foi no ano de 1988 e tornou-se determinante para o avanço das análises mecanísticas dos pavimentos em uso por permitirem medidas automáticas, rápidas e precisas das bacias deflectométricas. Entretanto, devido à ainda escassa disponibilidade deste equipamento no mercado, como também dos custos logísticos para a sua mobilização, levaram os técnicos e pesquisadores da área de pavimentação à procura de soluções mais versáteis. Surgiu assim, o equipamento denominado Deflectômetro de Impacto Leve (LWD).

O LWD é um equipamento portátil, desenvolvido na Alemanha e que avalia materiais pela sua deformação quando submetidos a uma carga dinâmica (ELHAKIM *et al.*, 2014).

De acordo com Preussler (2007), a utilização do LWD para a determinação da deformabilidade do pavimento incorpora a evolução tecnológica do FWD com a praticidade de utilização e custo inferior.

Vários estudos têm demonstrado que há correlações entre módulos de deformabilidade de camadas de pavimentos a partir de medidas de deflexões com o LWD e com o FWD, indicando o potencial deste último quanto à avaliação da integridade estrutural das camadas de pavimentos construídas por diferentes materiais (BURHANI, 2016; NAZZAL *et al.*, 2007 e HORAK *et al.*, 2008).

Segundo Pinto *et al.* (2013), a forma do pulso de carga gerada pelo equipamento é semelhante à obtida a partir de uma carga de roda em movimento. Logo, em função do carregamento dinâmico, o FWD reproduz com maior precisão as deformações do pavimento.

Conforme Moraes (2015), o LWD ainda tem seu emprego pouco difundido no Brasil, mas ressalta-se a importância de sua utilização em virtude de ser um ensaio de baixo custo, simples e de provocar pouca interferência no trânsito das cidades. A prática atual de projeto de reforço das rodovias federais está associada à utilização mais corrente de métodos baseados na análise do valor da deflexão característica atual do segmento como elemento principal de decisão de espessura de reforço, como acontece no método DNER PRO 269/94.

Um Termo de Execução Descentralizada (TED) foi celebrado entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, para estabelecer um novo método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, que recebeu, em 2018, o nome de Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Este método é composto de três

rotinas: uma de cálculo de tensões-deformações (AEMC), uma de retroanálise (BackMeDiNa), e uma de dimensionamento propriamente dita.

Neste contexto, esta dissertação de mestrado se justifica na importância de aprofundar o estudo realizado por Rodrigues (2018), fazendo uma análise comparativa dos valores de deflexão aferidas com o LWD com aquelas aferidas pelo levantamento deflectométrico realizado pelo FWD. A partir destas medidas deflectométricas será feito o dimensionamento das espessuras de reforço do revestimento asfáltico pelo MeDiNa e pelo DNER PRO 269/94 para as ruas analisadas na pesquisa, a fim de comparação e avaliar se o LWD pode substituir o FWD para tal finalidade.

1.2. OBJETIVOS

No bojo do que aqui se discute, esta pesquisa assume como objetivo geral realizar o comparativo de dimensionamento de reforço de quatro pavimentos asfálticos na cidade de Joinville realizado pelo Método mecanístico-empírico (MEDINA) e pela Metodologia do DNER PRO 269/94.

Para que o objetivo geral seja alcançado, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar os levantamentos deflectométricos através do LWD e FWD;
- Verificar se há correlação entre as medidas de deflexão aferidas por ambos os equipamentos;
- Determinar os módulos das camadas dos pavimentos através da retroanálise das bacias de deformação aferidas com o FWD, utilizando o programa BackMeDiNa;
- Estimar a vida útil dos pavimentos pelos Métodos MeDiNa e DNER PRO 269/94.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo propõe um debate conceitual, limitado aos elementos característicos que permitem a plena compreensão científica da aplicabilidade do estudo que ora se destaca.

2.1. O PAVIMENTO ASFÁLTICO

Sob a concepção da Engenharia, pavimento asfáltico é a camada constituída por um ou mais materiais que se aplica sobre o terreno natural ou terraplanado, cuja finalidade é permitir conforto e segurança na circulação de pessoas e veículos. Observando garantir tais aspectos de serventia, deve ser tratado na perspectiva de propor-lhe a melhor resistência possível.

2.1.1. Definições

É possível encontrar várias definições para o termo pavimento, sendo que todas são atreladas à sua função estruturante e operacional. A literatura define pavimento como uma estrutura composta por camadas sobrepostas, de diferentes materiais, que atendam estrutural e operacionalmente ao tráfego. Quando o revestimento desta composição é resultado de uma mistura de material pétreo e ligante betuminoso, o pavimento é dito asfáltico (CNT, 2017).

Conforme Fernandes Junior; Oda e Zerbini (1994), os pavimentos são estruturas construtivas complexas que envolvem muitas variáveis, tanto para o seu dimensionamento como para a avaliação de seu desempenho ao longo da sua vida útil, tais como: cargas e tipos do tráfego, solicitações ambientais, técnicas construtivas, práticas de manutenção e reabilitação, tipo e qualidade dos materiais, entre outros.

As camadas do pavimento são compostas por materiais de diferentes resistências e deformabilidade, inseridas em contato, resultando em uma estrutura complexa no que se refere ao cálculo de tensões e deformações (DNIT, 2006).

2.1.2. Análise de tensões em pavimento flexível

De acordo com Medina e Motta (2005), o pavimento deve ser projetado para suportar as cargas do tráfego de veículos que irão solicitá-lo ao longo da sua vida de projeto. Ainda, a estrutura de um pavimento é modelada como uma estrutura em camadas, submetida a carregamentos superficiais. O cálculo dos esforços nesta estrutura pode ser realizado por meio da teoria da elasticidade, a partir da caracterização da estrutura e dos materiais, aí incluídas as espessuras das camadas, as propriedades elásticas dos diversos materiais e a caracterização do tráfego atuante, discriminando os tipos de eixos e as cargas solicitantes.

Segundo Correia e Silva (2014), os pavimentos flexíveis, na composição clássica de base granular e revestimento de concreto asfáltico, rompem por dano à fadiga devido às deformações de tração na fibra inferior do revestimento ou por deformação permanente, devido ao acúmulo de deformações plásticas nas camadas, principalmente no subleito. Ao se projetar um pavimento deve-se determinar o estado de tensões e de deformações atuantes e compatibilizá-lo com o estado de tensões e deformações admissíveis para uma determinada vida de projeto.

A Figura 1 mostra a configuração de um pavimento e as principais tensões atuantes no interior de sua estrutura, sendo:

σ_0 = tensão do carregamento inicial;

σ_h = tensão horizontal de tração na fibra inferior da camada do revestimento de concreto asfáltico;

σ_v = tensão vertical de compressão no topo da camada do subleito;

h_1 = altura da camada do revestimento;

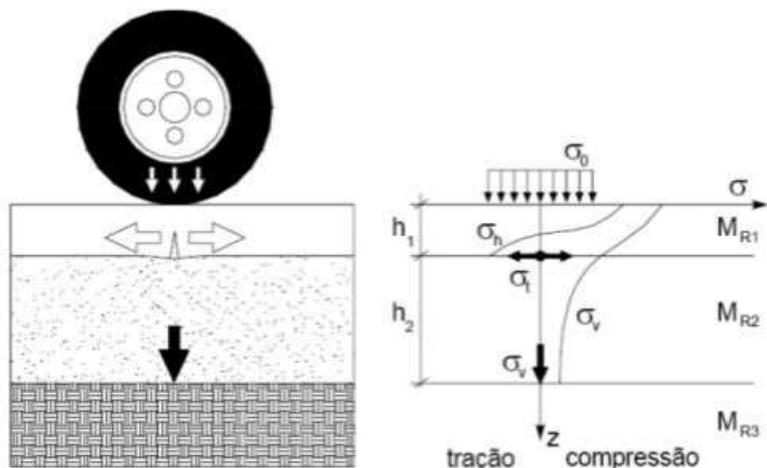
h_2 = altura da camada granular;

M_{R1} = módulo de resiliência do revestimento;

M_{R2} = módulo de resiliência da camada granular;

M_{R3} = módulo de resiliência do subleito.

Figura 1 - Tensões atuantes na estrutura de um pavimento flexível



Fonte: Correia e Silva (2014)

O estudo do efeito de cargas sobre um terreno foi iniciado pelo matemático francês Boussinesq, que em 1885, formulou um conjunto de equações para o cálculo de tensões e deformações em um meio semi-infinito, linear, elástico, homogêneo e isotrópico submetido a um carregamento pontual.

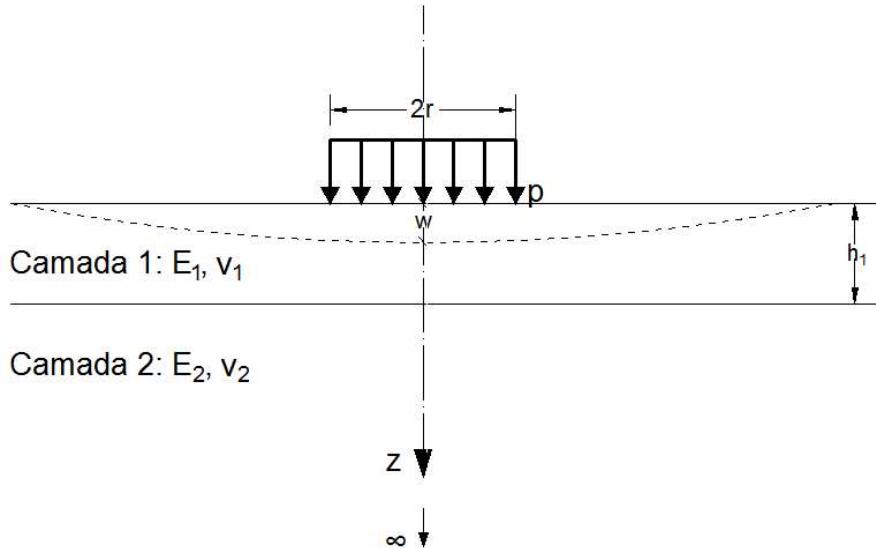
Observa-se, porém, que muitas vezes são discrepantes as deflexões medidas em campo em relação aos valores calculados com as expressões de Boussinesq, principalmente quando há revestimento asfáltico de elevada espessura ou uma camada rígida na composição do pavimento (MEDINA e MOTTA, 2005).

Ampliando o trabalho de Boussinesq, Burmister, engenheiro norte-americano especialista em Geotecnia, apresentou em 1943, uma série de três artigos que estabeleceram as bases para o que veio a ser chamado de Teoria de Sistema de Camadas Elásticas (TSCE), de acordo com as seguintes hipóteses:

- a) A carga aplicada é estática, uniformemente distribuída em uma área circular, e o contato é flexível, então as deflexões no centro da área carregada são maiores do que nas bordas;
- b) A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada e nesta área só ocorrem tensões normais, mas a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- c) As camadas são homogêneas, isotrópicas e constituídas por materiais linearmente elásticos;
- d) As camadas não têm peso e são ilimitadas na direção transversal, com espessura finita, à exceção da camada inferior que tem espessura infinita e, portanto, é uma camada semi-infinita;
- e) Se as camadas estão completamente aderidas uma às outras, aparecem tensões cisalhantes na interface e os deslocamentos horizontais na interface são os mesmos para as duas camadas. Se não há aderência entre as camadas, ou seja, há deslizamento, os deslocamentos horizontais são diferentes. Pelas condições de equilíbrio e continuidade, a tensão vertical e os deslocamentos verticais na interface são os mesmos para as duas camadas.

A Figura 02 representa a atuação do carregamento sobre a camada de revestimento e as tensões e deformações geradas na estrutura do pavimento.

Figura 2 - Carregamento circular assimétrico num sistema de duas camadas



Fonte: Correia e Silva (2014)

Onde,

w : é a deflexão da superfície no centro do carregamento (m);

p : é a pressão de contato do carregamento circular (MPa);

r : é o raio do carregamento (m);

E_2 : é o módulo elástico da camada do subleito (MPa);

v_2 : é o coeficiente de Poisson da camada do subleito (MPa).

De acordo com Correia e Silva (2014), na década de 70, surgiram os primeiros programas computacionais de cálculo de tensões e deformações em vários pontos das camadas dos pavimentos, o que levou a uma economia de tempo nesta tarefa.

Conforme Franco (2007), com a disponibilidade de computadores mais modernos e o desenvolvimento da informática, diversos programas de computador têm sido desenvolvidos para o cálculo de tensões e deformações em estruturas de camadas elásticas, permitindo assim, dimensionar os pavimentos asfálticos.

2.2. MANUTENÇÃO VIÁRIA

2.2.1. Definições

Segundo Machado (2019), a estrutura de um pavimento sofre um processo progressivo de degradação, o que concorre para uma atenuação de sua funcionalidade. Tal

processo é resultante da ação de agentes de intemperismo, que são as modificações físicas e químicas inatas dos materiais componentes do pavimento e, da ação repetida das cargas sobre o mesmo. Em comparação a outros tipos de estruturas, a velocidade de deterioração tende a ser superior em um pavimento, visto sua ampla exposição ao clima e intensa solicitação pelas cargas de tráfego.

As características da malha, incluindo o seu estado de conservação, a qualidade do pavimento e a sua manutenção contínua, influenciam diretamente a segurança, os custos e a eficiência energética do transporte, refletindo também no meio ambiente, na saúde dos trabalhadores do setor e da população (CNT, 2019).

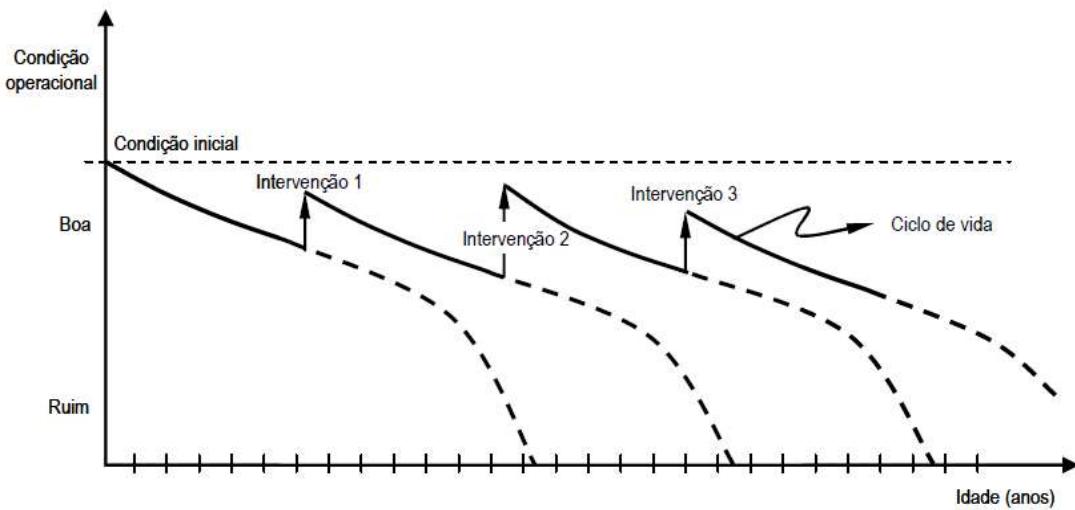
A manutenção rodoviária é um processo que deve ser realizado de modo contínuo, com ações sistemáticas e programadas, possibilitando que a rodovia possa oferecer ao usuário, permanentemente, um tráfego econômico, confortável e seguro (DNIT, 2005).

De acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), a definição das expressões relativas à manutenção rodoviária, tais como a restauração e reabilitação do pavimento, entre outras, não é tarefa simples. Em diversos países e órgãos rodoviários verificam-se diferentes definições ou classificações para diversas intervenções realizadas no pavimento, após sua construção inicial.

Conforme Franco (2007), os pavimentos são dimensionados para determinados ciclos de vida, sendo que a cada renovação de ciclo os pavimentos são redimensionados com base nas suas atuais condições e nos parâmetros do tráfego esperados para o novo ciclo. Essa condição operacional vai sendo degradada ao longo do tempo devido aos problemas construtivos, à passagem das cargas e às ações climáticas. Quando o pavimento sofre qualquer intervenção de manutenção, conservação ou reabilitação, a sua condição operacional se mantém satisfatória por mais tempo.

Esse ciclo de degradação e conservação é chamado de ciclo de vida do pavimento, e está retratado na Figura 3.

Figura 3 - Ciclo de vida de uma estrutura de pavimento



Fonte: Franco (2007)

Assim sendo, Machado (2019) cita que é justificável dizer que é imprescindível a um sistema de gerenciamento o acompanhamento rotineiro do desempenho funcional e estrutural de um pavimento, o que influencia não somente os custos diretos de conservação e manutenção, mas igualmente em todas as outras frações do custo total do transporte (custos operacionais de veículos, acidentes, interrupções no tráfego devido às intervenções no pavimento).

2.2.2. Processo de degradação dos pavimentos asfálticos

Segundo Souza Junior (2018), o dano causado pela passagem de cada veículo é, usualmente, de pequena magnitude, mas o efeito acumulativo deste dano é que determina a vida de fadiga dos pavimentos. O fator preponderante que leva os pavimentos ao final de sua vida útil é este efeito acumulado. Um pavimento dificilmente sofre ruptura súbita, sendo que a sua degradação se dá de forma contínua, ao longo do tempo.

De acordo com Balbo (1997), a fadiga ocorre quando os materiais, sendo repetidamente solicitados a níveis de tensões inferiores aos de ruptura, aos poucos vão desenvolvendo alterações em sua estrutura interna, gerando um processo de microfissuração, que ocasiona a fratura e o rompimento dos materiais.

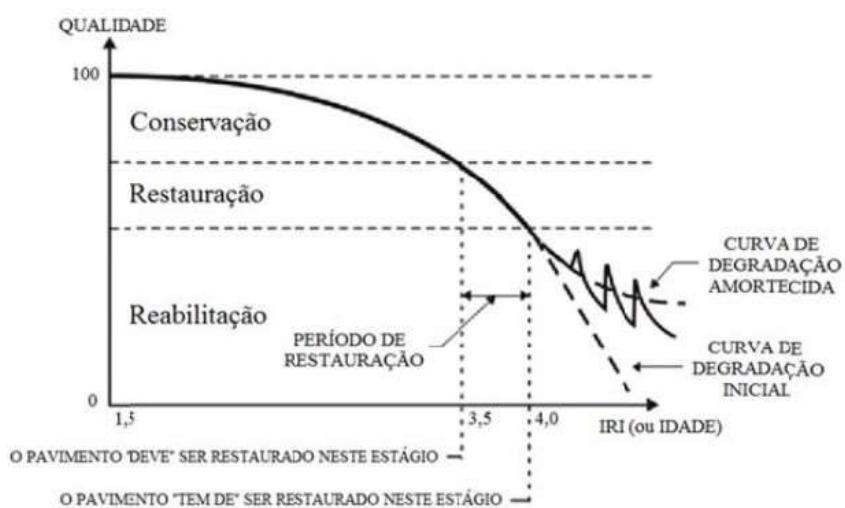
Conforme Souza Junior (2018), a causa da ocorrência dos defeitos estruturais (trincamento e afundamento em trilhas de roda) é devida à ação das cargas do tráfego sobre a superfície dos pavimentos que gera uma deformação total na estrutura. Esta deformação total

é composta pelas parcelas de deformação resiliente ou reversível e deformação permanente, ou plástica.

Ainda, de acordo com Souza Junior (2018), embora realizadas as atividades de conservação, quando se aproxima ao final do ciclo de vida, o pavimento passa a apresentar desempenho próximo de sua condição limite, e sua deterioração tenderá a crescer de maneira acentuada.

A Figura 4 exemplifica o desempenho do pavimento ao longo de seu ciclo de vida, de acordo com a evolução do índice de irregularidade longitudinal (IRI) e, consequente queda do nível da qualidade do mesmo, e evidencia a interface entre as atividades de manutenção rodoviária após a sua implantação.

Figura 4 - Desempenho do pavimento ao longo de seu ciclo de vida



Fonte: DNIT (2006b)

2.2.3. Avaliação dos pavimentos asfálticos

A avaliação do pavimento deverá contemplar a determinação das condições de superfície, irregularidade longitudinal, condições estruturais, solicitações do tráfego e aderência pneu-pavimento (DNIT, 2006b).

De acordo com Freitas (2001 *apud* LUZ, 2017), avaliação funcional refere-se aos processos de identificação e caracterização de aspectos relacionados às condições da superfície de rolamento. Por sua vez, a avaliação estrutural está relacionada ao estado da

estrutura do pavimento quanto à capacidade de suportar as cargas para o qual o pavimento foi projetado.

Segundo Luz (2017), essas avaliações têm igual importância e se complementam, pois problemas funcionais que se manifestam na superfície do pavimento podem surgir em decorrência de alguma deficiência estrutural.

2.3. AVALIAÇÃO FUNCIONAL DO PAVIMENTO

Gontijo, Guimarães e Nogueira (1994) associaram a avaliação funcional do pavimento ao conforto do rolamento, condição da superfície, interação pneu-pavimento, defeitos e irregularidades. De acordo com os autores, esta avaliação se refere à capacidade do pavimento de satisfazer a sua principal função, que é fornecer uma superfície adequada em termos de qualidade de rolamento. A avaliação da condição funcional da pista é verificada ainda de forma subjetiva, dependendo muito da experiência e destreza do avaliador – apesar da evolução das técnicas de medidas de irregularidade, com equipamentos medidores acoplados a veículo, por exemplo. Essas novas técnicas permitem uma avaliação objetiva da pista, reproduzindo a percepção do usuário quanto às condições de trafegabilidade.

Segundo Gontijo *et al.* (1994 *apud* BORGES, 2001), as características funcionais compreendem as características de degradação superficial (trincas, panelas, exsudações, desgastes, etc.) e de deformação de perfil (deformações permanentes: irregularidades transversais e longitudinais) do pavimento existente. A partir desta análise é que se deve definir a natureza e o tipo das operações corretivas necessárias.

Conforme Hass *et al.* (1994 *apud* NOBREGA, 2003), a avaliação de pavimentos consiste numa série de atividades que fornecem informações sobre o seu estado de conservação atual, particularmente no que diz respeito às condições estruturais do pavimento e da capacidade de oferecer aos seus usuários conforto e segurança durante a trafegabilidade de veículos. Estas informações são utilizadas no planejamento e projeto de serviços de gerência de pavimentos, norteando os serviços de manutenção e restauração da rodovia.

Nos itens subsequentes é realizada breve exposição sobre defeitos da superfície do pavimento e irregularidade longitudinal, termos que constituem as duas principais formas de avaliação funcional dos pavimentos.

2.3.1. Defeitos da superfície de rolamento

Conforme Krysiński e Sudyka (2013), os defeitos de superfície do pavimento dependem do tipo de estrutura da pista e representam a manifestação direta do processo de deterioração da estrada em uso pelo tráfego associado aos fatores ambientais.

Para Zanchetta (2005), existem algumas diferenças nos defeitos considerados na avaliação da superfície dos pavimentos que são importantes salientar, sejam eles rodoviários ou urbanos. Conforme o autor, o defeito “desnível pista-acostamento”, por exemplo, encontrado em rodovias, não é observado em pavimentos urbanos. Outros defeitos, como trincas transversais, agregados polidos e bombeamento de finos raramente são encontradas em vias urbanas. Como a velocidade dos veículos é maior nas rodovias, a irregularidade longitudinal tem grande importância, o que não ocorre em vias urbanas, onde a velocidade é menor.

Segundo Fernandes Júnior e Zerbini (1994), as atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos devem ser realizadas de forma contínua, devido ao constante aparecimento de defeitos, causados pelas solicitações impostas pelo tráfego e pelo meio ambiente. Já sua deterioração do pavimento pode manifestar-se sob diferentes formas: trincas (por fadiga, em blocos, nos bordos, longitudinais, por reflexão e transversais), remendos, panelas (ou buracos), distorções (acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda e corrugação), defeitos na superfície (desintegração ou desgaste, agregados polidos e exsudação), desnível entre pista e acostamento e bombeamento (saída de água pelas trincas do pavimento sob ação das cargas do tráfego).

Para o DNIT (2003a), os defeitos de superfície são os danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos que podem ser identificados a olho nu e classificados segundo uma terminologia normatizada (DNIT 005/2003-TER-DNIT). O levantamento dos defeitos de superfície tem por finalidade avaliar o estado de conservação dos pavimentos asfálticos e embasa o diagnóstico da situação funcional para subsidiar a definição de uma solução tecnicamente adequada e, em caso de necessidade, indicar a melhor ou melhores alternativas de restauração do pavimento.

O Quadro 1 apresenta um breve resumo dos defeitos de pavimentos, bem como sua codificação e classificação de acordo com o Anexo A da Norma DNIT 005/2003-TER.

Quadro 1 - Resumo dos defeitos – Codificação e classificação (Anexo A da Norma DNIT 005/2003-TER)

FENDAS			CODIFICAÇÃO	CLASSE DAS FENDAS			
Fissuras			FI	-	-	-	
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Transversais	Curtas	TTC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TTL	FC-1	FC-2	FC-3
		Longitudinais	Curtas	TLC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TLL	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	"Jacaré"	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	J	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	JE	-	-	FC-3
	Trincas Isoladas	Devido à retração térmica ou dissecação da base (solo-cimento) ou do revestimento		TRR	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	"Bloco"	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	TB	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	TBE	-		FC-3
OUTROS DEFEITOS					CODIFICAÇÃO		
Afundamento	Plástico	Local	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito			ALP	
		da Trilha	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito			ATP	
	De Consolidação	Local	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito			ALC	
		da Trilha	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito			ATC	
Ondulação/Corrugação - Ondulações transversais causadas por instabilidade da mistura betuminosa constituinte do revestimento ou da base					O		
Escorregamento (do revestimento betuminoso)					E		
Exsudação do ligante betuminoso no revestimento					EX		
Desgaste acentuado na superfície do revestimento					D		
"Panelas" ou buracos decorrentes da desagregação do revestimento e às vezes de camadas inferiores					P		
Remendos			Remendo Superficial			RS	
			Remendo Profundo			RP	

NOTA 1: Classe das trincas isoladas

FC-1: são trincas com abertura superior à das fissuras e menores que 1,0mm.

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

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

NOTA 2: Classe das trincas interligadas

As trincas interligadas são classificadas como FC-3 e FC-2 caso apresentem ou não erosão nas bordas.

Fonte: Norma do DNIT, alterada pelo autor (2020)

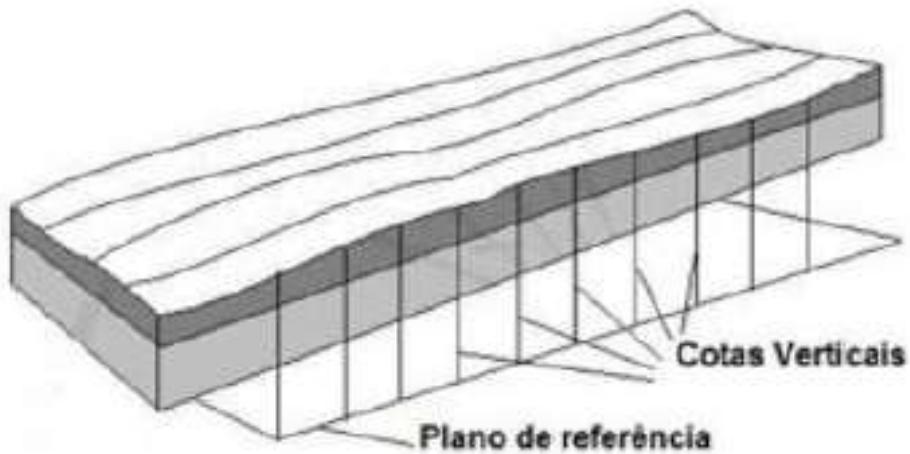
2.3.2. Irregularidade longitudinal

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), conceitua-se índice de irregularidade internacional (IRI) como o conjunto dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano de referências – desvios estes que, entre vários inconvenientes, afetam a qualidade do rolamento e a ação dinâmica das cargas sobre a via.

Definida como o desvio da superfície em relação a um plano de referência, conforme a Figura 5, a irregularidade longitudinal afeta não somente o conforto ao rolamento da via,

como também compromete sua segurança, consistindo, portanto, em um importante elemento indicativo do estado funcional de um pavimento, conforme cita Machado (2019).

Figura 5 - Esquema representativo de irregularidade de um pavimento asfáltico



Fonte: Machado (2019)

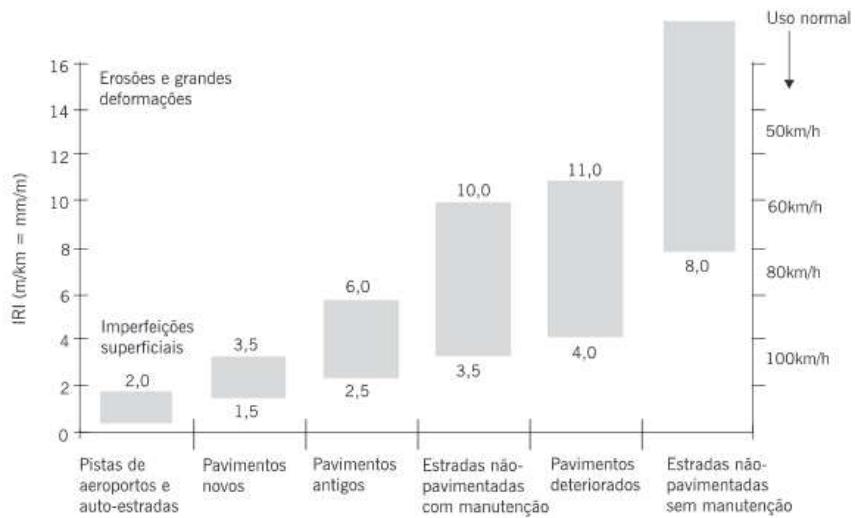
O IRI é um índice estatístico, expresso em m/km, que mensura os desvios da superfície do pavimento em relação à de projeto, representando deslocamentos acumulados na unidade de distância percorrida (FRITZEN E MOTTA, 2018).

Conforme Benevides (2006), alguns possíveis causadores de irregularidades no pavimento são: os fatores climáticos, a influência do meio ambiente, a solicitação pela ação do tráfego e defeitos causados por problemas construtivos. Podem ser várias as causas, isoladas ou em conjunto, tais como: projetos com dimensionamento inadequado, defeitos construtivos ou de materiais, deficiência de manutenção e/ou gerenciamento da via, falta de controle de excesso de carga, e as intempéries, conclui.

De acordo com Souza Junior (2018), o IRI é o índice que mais se usa atualmente para a medida da irregularidade e, tem sido empregado como ferramenta de controle de obras e aceitação de serviços de pavimentação em alguns países e também no Brasil.

A Figura 6 mostra as faixas de variação do IRI em diferentes tipos de pavimentos e velocidades de circulação do tráfego. Para pavimentos deteriorados, por exemplo, o IRI fica entre 4 e 11 mm/m para velocidades do tráfego entre 100 e 50 km/h.

Figura 6 - Faixas de variação do IRI para diferentes tipos de pavimentos e velocidades de circulação do tráfego



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

2.4. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO

Avaliar estruturalmente o pavimento possibilita diagnosticar a ocorrência de defeitos existentes e suas causas, bem como propiciar a seleção e o dimensionamento da alternativa de restauração mais apropriada, com o objetivo de garantir a vida de projeto da estrutura dimensionada (DNIT, 2006; FONSECA, 2013).

Segundo Borges (2001), a avaliação estrutural verifica a capacidade de carga do pavimento, compreendendo o estudo das características de resistência e de deformabilidade de suas camadas. Dados referentes à adequabilidade estrutural do pavimento são essenciais para determinar o diagnóstico da qualidade global do pavimento.

2.4.1. Deformabilidade do Pavimento Asfáltico

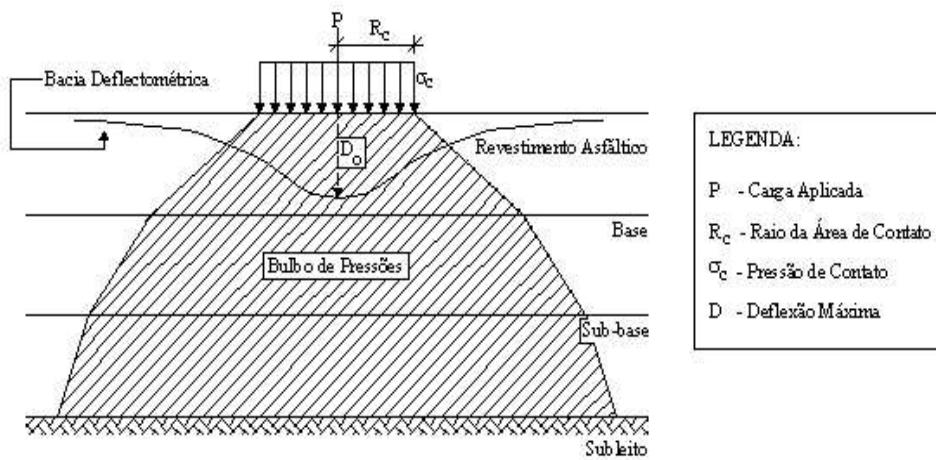
Segundo Bernucci *et al.* (2006) a capacidade da estrutura de um pavimento é determinada através das deformações sofridas quando esta é solicitada por uma carga conhecida. Essas deformações se manifestam em duas componentes: deformações plásticas (permanentes) e deformações elásticas (recuperáveis).

As deformações plásticas consistem na parte do deslocamento vertical que permanecem na estrutura após o descarregamento, sendo assim, tem caráter residual. Essas deformações são as responsáveis pela formação de afundamentos nas trilhas de roda (DNIT, 2006a).

As deformações ou deflexões elásticas correspondem a parte do deslocamento vertical causado na estrutura dos pavimentos, devido a atuação de uma carga, de modo que, cessado o esforço, a estrutura retorna à sua posição inicial. Esse comportamento provoca o arqueamento das camadas do pavimento, sendo a sua sucessiva repetição responsável pelo fenômeno de fadiga das camadas betuminosas e cimentadas (DNIT, 2006a).

De acordo com Nobrega (2003), o formato das bacias de deflexão é função, tanto do carregamento aplicado na superfície, como das características geométricas e elásticas das diversas camadas que compõem o pavimento. Como mostra a Figura 7, durante o carregamento, a região onde são impostos os esforços no interior das camadas vai se alargando em função da profundidade e propriedades mecânicas da cada camada. Desta forma, a deflexão superficial que se apresenta no centro da aplicação da carga depende de todo arranjo estrutural do pavimento, já as deflexões situadas na zona mais afastada deste ponto são influenciadas apenas pelo módulo de elasticidade do subleito. Por último, as deflexões referentes às distâncias intermediárias são função das camadas intermediárias: base, sub-base e, também, do subleito.

Figura 7 - Representação da região do pavimento submetida aos esforços das cargas do tráfego

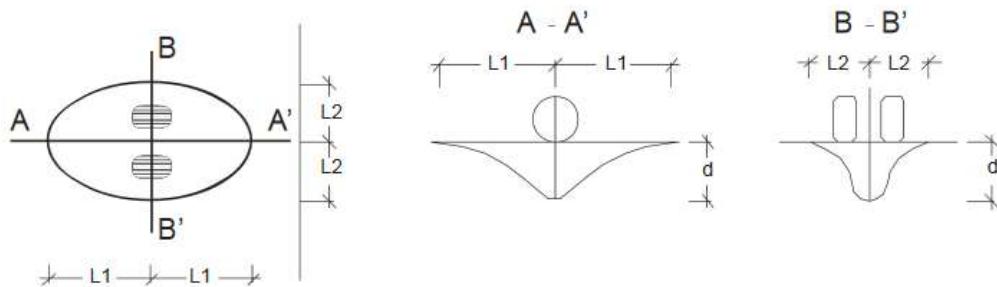


Fonte: Nobrega (2003)

Conforme Pinto e Preussler (2002), o principal efeito ocasionado pela aplicação de carga por uma roda dupla de um veículo em um determinado ponto é a deformação recuperável, que assume a forma aproximada de uma elipse, cujo eixo maior coincide com a direção de deslocamento do tráfego.

Para a superfície formada dá-se o nome de bacia deflectométrica e a mesma é ilustrada na Figura 8.

Figura 8 - Ilustração da bacia deflectométrica



Fonte: DNIT (2006a)

2.4.2. Parâmetros das Bacias Deflectométricas

Segundo Hvemm (1955 *apud* SOUZA JUNIOR, 2018), a partir do ano de 1938, estudos realizados na Califórnia determinaram uma série de medidas de deslocamentos verticais em pavimentos sujeitos à ação de uma carga de rodas. Ao cessar a solicitação, a parcela das deformações que se recuperou de forma elástica foi chamada de resiliente, enquanto a outra, não recuperável, foi denominada plástica.

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), através do ensaio de avaliação estrutural não destrutivo é possível determinar os seguintes parâmetros para as medidas deflectométricas obtidas:

a) Deflexão máxima (D_0): Trata-se do deslocamento vertical sob o centro das rodas duplas de um eixo simples, no caso da Viga Benkelman, ou sob o centro da carga no LWD e no FWD;

b) Bacia de deformação: Trata-se das medidas dos deslocamentos elásticos em determinados pontos a partir do centro do carregamento (D_0 , D_{25} , D_{50} , etc.). Permite a representação da resposta do comportamento estrutural do pavimento através da aplicação de um carregamento pontual.

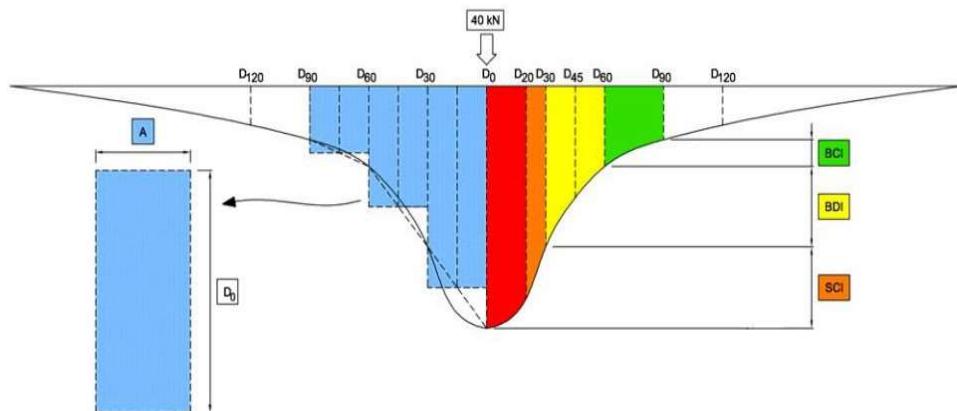
Conforme o DNIT, o valor da deflexão característica (DC) é calculado para cada segmento homogêneo da rodovia, sendo obtido através da soma entre o desvio padrão da amostra e a média aritmética dos valores de deflexão contidos no intervalo de aceitação.

De acordo com Sapem (2014 *apud* SOUZA JUNIOR, 2018) existem alguns indicadores adicionais no que se refere à forma da bacia de deflexão, de forma a se obter uma

melhor indicação das propriedades das camadas dos pavimentos, tais como: o *Surface Curvature Index* (SCI - Índice de Curvatura da Superfície), o *Base Damage Index* (BDI - Índice de Danos na Base) e o *Base Curvature Index* (BCI - Índice de Curvatura da Base).

De acordo com Ferri (2013 *apud* SOUZA JUNIOR, 2018), estes indicadores podem ser observados na Figura 9.

Figura 9 - Representação gráfica da bacia deflectométrica e os respectivos índices de curvatura



Fonte: Souza Junior (2018)

2.4.2.1. Raio de Curvatura

De acordo com Ferri (2013 *apud* NERY, 2020), o raio de curvatura (RC) é um parâmetro indicativo do arqueamento da bacia deflectométrica na sua porção mais crítica, em geral considerada a 25 cm do centro da carga.

Conforme Macedo (2003 *apud* SOUZA JUNIOR, 2018), o raio de curvatura está intimamente ligado à rigidez do pavimento, vindo a complementar a deflexão máxima (D_0) na análise da capacidade estrutural do pavimento.

O raio de curvatura é um importante parâmetro, pois diferentes estruturas de pavimento podem apresentar a mesma deflexão máxima e possuírem condições estruturais diferentes.

Ao entrar na fase de fadiga, o pavimento perde rapidamente sua rigidez, tendo como consequência o aumento do D_0 e diminuição do RC.

O RC é determinado pela Equação 1, que é definida na norma DNER 024/94, que especifica a execução do ensaio de Viga Benkelman. Considera que o ponto de arqueamento ocorre a uma distância de 25 cm do ponto de aplicação da carga.

$$RC = \frac{6250}{2x(D_0 - D_{25})} \quad (1)$$

Onde:

RC: raio de curvatura (m);

D₀: deflexão máxima (0,01 mm);

D₂₅: deflexão a 25 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm).

2.4.2.2. Índice de Curvatura da Superfície (SCI)

De acordo com Kim e Ranjithan (2002), o SCI é o indicador mais sensível para evidenciar a situação da rigidez da camada de revestimento asfáltico, sendo definido como a diferença entre D₀ e D₃₀, considerando a bacia deflectométrica obtida na avaliação dos pavimentos, com aplicação de uma carga de roda de aproximadamente 4.100 kgf, de acordo com a equação 2. Os valores de SCI superiores a 25×10^{-2} mm indicam que a camada de revestimento é pouco resistente ou é de pequena espessura, sendo muito deformável.

$$SCI = D_0 - D_{30} \quad (2)$$

Onde:

SCI: é o valor do parâmetro (0,01 mm);

D₀: deflexão máxima (0,01 mm);

D₃₀: deflexão a 30 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm).

2.4.2.3. Índice de Danos na Base (BDI)

Conforme Kim e Ranjithan (2002), o BDI indica a condição da base, sendo definido como a diferença entre D₃₀ e D₆₀, de acordo com a equação 3, considerando a bacia deflectométrica obtida na avaliação dos pavimentos, com aplicação de uma carga de roda de aproximadamente 4.100 kgf. Valores de BDI superiores a 40×10^{-2} mm indicam pavimentos pouco resistentes ou pavimentos com problemas estruturais.

$$BDI = D_{30} - D_{60} \quad (3)$$

Onde:

BDI: é o valor do parâmetro (0,01 mm);

D₃₀: deflexão a 30 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D₆₀: deflexão a 60 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm).

2.4.2.4. Índice de Curvatura da Base (BCI)

Segundo Kim e Ranjithan (2002), o BCI pode ser usado como o indicador para verificar a condição do subleito, sendo definido como a diferença entre D60 e D90, de acordo com a equação 4, considerando a bacia deflectométrica obtida por equipamentos não destrutíveis. Os valores médios dos resultados de BCI superiores a 10×10^{-2} mm indicam problemas estruturais no subleito.

$$BCI = D60 - D90 \quad (4)$$

Onde:

BCI: é o valor do parâmetro (0,01 mm);

D60: deflexão a 60 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D90: deflexão a 90 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm).

2.4.3. Fatores que Influenciam nos Valores de Deflexão

De acordo com Moraes (2015), os fatores que influenciam nas respostas deflectométricas do pavimento são os efeitos sazonais de umidade, a temperatura no momento da medição, o carregamento utilizado e o posicionamento dos sensores.

Medina e Motta (2005) citam que o clima é um condicionante do desempenho dos pavimentos, pois a rigidez dos revestimentos asfálticos é função da temperatura, e a resiliência dos solos e dos materiais granulares é influenciada pelo seu grau de saturação. Assim, a deformabilidade maior ou menor do pavimento é condicionada pelas variações de temperatura e de umidade.

2.4.3.1. Efeitos Sazonais da Umidade

De acordo com Carneiro (1966 *apud* BORGES, 2001), os valores das deflexões variam de acordo com a época de seu levantamento pois estão intimamente ligados ao comportamento do subleito do pavimento. A capacidade de suporte dos solos do subleito varia com a umidade, e esta varia ao longo do ano. Nos meses em que o solo está mais úmido, a deflexão é mais elevada.

Conforme Souza Junior (2018), durante a estação chuvosa o teor de umidade do subleito pode aumentar, diminuindo assim sua capacidade de suporte. Como esses períodos variam ao longo do ano, o valor da deflexão medida no pavimento não será constante, sendo dependente da época em que forem realizados os levantamentos deflectométricos.

A resiliência dos solos e dos materiais depende do teor de umidade e, tendo em conta que um pavimento está exposto a variações sazonais de umidade, então a determinação contínua do teor de umidade é um ganho tanto para o dimensionamento de pavimento como para a sua manutenção, conservação e reabilitação, de acordo com Medina (2006).

De acordo com o DNER-PRO 10 (1979), a época do ano mais indicada a realização de levantamentos deflectométricos é imediatamente após a estação chuvosa, onde o subleito se encontra na condição mais desfavorável.

2.4.3.2. Temperatura

De acordo com Motta e Medina (1986 *apud* MORAES, 2015), as misturas asfálticas têm um comportamento visco-elastoplástico, onde a rigidez dos revestimentos betuminosos varia bastante em função da temperatura. Quando esta diminui, o ligante betuminoso se torna mais viscoso e o revestimento mais rígido, e, em consequência, aumenta a capacidade de distribuição das tensões das cargas do tráfego para as camadas subjacentes do pavimento e, consequentemente, diminui o valor da deflexão.

Ainda, conforme os autores, nos pavimentos flexíveis, a temperatura afeta principalmente a deflexão sob o ponto de aplicação da carga (D0) devido ao comportamento reológico da camada asfáltica. Em pavimentos flexíveis, o efeito da temperatura nas deflexões é tanto maior quanto mais espessa for a camada asfáltica.

Conforme Franco (2007), a temperatura do ar atua diretamente nas propriedades resilientes dos materiais asfálticos devido à natureza viscosa do ligante asfáltico. De acordo com o autor, essa influência da temperatura, no entanto, não é muito observada nos demais materiais utilizados em pavimentação.

Correções dos valores de deflexão em função de uma temperatura de referência são previstos no Guia de Gerência de Pavimentos do DNER (1983), no guia da AASHTO (1993) e pelo DER/SP (2006).

O DER-SP (2006, *apud* NERY, 2020) recomenda a correção das deflexões em função da espessura e da temperatura da superfície do revestimento asfáltico no momento do ensaio para uma temperatura padrão de 25 °C.

Bueno (2016, *apud* Souza Junior, 2018) conclui que correções em valores de deflexão medidos em temperaturas de superfície próximas a temperatura de referência (25 °C) são dispensáveis, pois não acarretam em modificações significativas nos módulos de elasticidade das camadas do conjunto. Em caso positivo, corrige-se as medidas de deflexão de campo de acordo com a Equação 5 e repete-se o processo iterativo, objetivando modificar apenas o

módulo de elasticidade do revestimento. Finalizada a nova retroanálise, é identificado o módulo da camada termossuscetível (revestimento) à 25 °C.

$$D25 = \frac{D}{\frac{hca}{1000}x(T-25)+1} \quad (5)$$

Onde:

D25: deflexão corrigida para temperatura de 25 °C (0,01 mm);

D: deflexão medida (0,01 mm);

hca: altura da camada asfáltica (cm);

T: temperatura da superfície do revestimento asfáltico no momento do ensaio (°C).

2.4.3.3. Carregamento

Conforme Rocha Filho (1996, apud MORAES, 2015), nas avaliações estruturais dos pavimentos, a magnitude das deflexões é extremamente afetada pelo modo de carregamento utilizado. Segundo o autor, a influência do modo de carregamento sobre as deflexões pode ser mais bem evidenciada quando é analisado o perfil de deflexões obtidas pelo emprego de equipamentos que utilizam modos diferentes de aplicação de carregamento, tais como a viga Benkelman, LWD ou FWD.

De acordo com estudos de Tholen *et al.* (1985, apud BORGES, 2001), as pesquisas realizadas analisaram os efeitos de diferentes modos de carregamento aplicados em pavimentos e concluíram que o modo de carregamento utilizado afeta a magnitude das deflexões e que, dentre todos os tipos de equipamentos analisados, o FWD foi o que melhor simulou o efeito das cargas do tráfego nos pavimentos.

2.4.3.4. Posicionamento dos sensores

De acordo com Nobrega (2003), como as deflexões são medidas em 0,01 mm, pequenos erros nas leituras deste parâmetro podem gerar grandes efeitos nos resultados de uma avaliação estrutural. Tem também importância saber a que distância do centro da área carregada estão posicionados os sensores que vão medir as deflexões ao longo da bacia de deformação.

Conforme Rocha Filho (1996, apud MORAES, 2015), observou-se que o posicionamento dos sensores tem grande influência na obtenção dos módulos de elasticidade calculados por retroanálise. Esses sensores registram os deslocamentos verticais referentes à contribuição das camadas que estão sob o estado de tensões provocado pelo carregamento

aplicado ao longo da vertical que passa pelo sensor. Assim, a escolha mais adequada para as distâncias entre sensores deve ser em função da rigidez e das espessuras das camadas do pavimento que será avaliado.

Segundo PINTO e DOMINGUES (2001), geralmente são empregados os seguintes posicionamentos dos sensores:

- Para pavimentos flexíveis: 0, 20, 30, 45, 65, 90 e 120 cm;
- Para pavimentos rígidos: 0, 20, 30, 80, 100, 160 e 200 cm.

2.4.4. Módulo Resiliente e o Coeficiente de Poisson

Os métodos usuais tradicionais de dimensionamento de pavimentos foram desenvolvidos de forma empírica, tendo como principal desvantagem a limitação do seu uso, podendo ser utilizados somente em casos similares ao do seu desenvolvimento. Com o surgimento dos programas computacionais, o dimensionamento passou a ser baseado na teoria da elasticidade, onde os principais parâmetros necessários ao cálculo das espessuras das camadas dos pavimentos são os módulos de resiliência e o coeficiente de Poisson (MEDINA, 1997).

Conforme Santos (2003), o módulo de resiliência pode ser obtido através de ensaios de laboratório, como o de compressão diametral (para misturas asfálticas e materiais cimentados) e o triaxial cíclico (para materiais granulares), sendo este último o de maior utilização. De acordo com o autor, os ensaios de laboratório são mais vantajosos que o procedimento de retroanálise por permitir um maior controle das condições das amostras utilizadas nos sistemas de aplicação do carregamento e das medidas dos deslocamentos empregados.

Segundo Machado (2019, apud DNIT, 2006a), o módulo de deformação resiliente é o valor determinado através de ensaios de cargas repetidas realizados em laboratório. O carregamento geralmente tem duração de 0,10 segundos e o tempo de repouso é de 0,90 segundos. Tanto a parcela elástica instantânea quanto a viscoelástica são computadas e, portanto, toda a deformação recuperável é inserida no cálculo.

No Brasil, o DNIT atualizou o método de ensaio do módulo de resiliência em misturas asfálticas através da normativa 135-ME (DNIT, 2018b). Para solos e materiais não estabilizados quimicamente, a norma revisada é a 134-ME (DNIT, 2018a).

Pinto & Preussler (2002) informam que o valor do módulo de resiliência obtido em laboratório é a relação entre tensão desvio aplicada (σ_d) e a respectiva deformação resiliente (ϵ_r) sofrida, conforme a Equação 6:

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (6)$$

Onde:

Mr: módulo de resiliência;

σ_d : tensão desvio aplicada repetidamente;

ε_r : deformação resiliente.

De acordo com Nobrega (2003), o coeficiente de Poisson (ν) define a relação entre as deformações específicas radiais (horizontais) e axiais (verticais) dos materiais. Sua influência nos valores das tensões e deformações calculadas é pequena, salvo no caso das deformações radiais, as quais lhe são proporcionais. Na maioria das vezes este valor é adotado para cada material quando são usados programas de cálculo de tensões e deformações em pavimentos.

Conforme Balbo (2007, apud NERY, 2020), o coeficiente de Poisson (ν) é determinado através de um ensaio de compressão uniaxial e é calculado como o inverso da razão entre a deformação vertical e a deformação horizontal medidas no corpo de prova. Segundo o autor, no processo de retroanálise, deve ser mantido um valor constante de (ν) para cada camada do pavimento.

A Tabela 1 apresenta os valores típicos para o coeficiente de Poisson segundo Balbo (2007, apud NERY, 2020).

Tabela 1 - Valores típicos para o coeficiente de Poisson

Material	Faixa de variação
Misturas asfálticas	0,32 – 0,38
Concreto de cimento Portland	0,15 – 0,20
Brita graduada simples	
Macadame hidráulico	0,35 – 0,40
Bica corrida	
Concreto compactado por rolo (CCR)	0,15 – 0,20
Brita graduada tratada com cimento (BGTC)	
Solo cimento	0,20 – 0,30
Solo melhorado com cimento	
Solo cal	0,25 – 0,30

Solos arenosos	0,30 – 0,35
Areias compactadas	0,35 – 0,40
Solos finos	0,40 – 0,45

Fonte: Nery (2020), adaptado pelo Autor

No módulo de retroanálise BackMeDiNa, de acordo com a versão 1.2.0 (julho/2020), estão pré-definidos os seguintes valores para o coeficiente de Poisson:

- Camadas asfálticas = 0,30;
- Camadas estabilizadas = 0,20;
- Camadas granulares = 0,40;
- Camadas em solos naturais = 0,45.

2.4.5. Determinação do módulo de elasticidade por retroanálise

De acordo com Nobrega (2013), a retroanálise de bacias deflectométricas é um procedimento que permite a obtenção do módulo de resiliência das camadas do pavimento e do subleito. Segundo o autor, dentre os benefícios proporcionados pela retroanálise estão a minoração da necessidade de ensaios destrutivos (para a coleta de amostras) e a acurácia das propriedades elásticas das camadas do pavimento.

A retroanalise é utilizada para estimar os módulos de elasticidade das camadas, o que permite uma avaliação estrutural mais adequada e o cálculo do reforço estrutural, se necessário, pelos princípios da mecânica dos pavimentos (MEDINA e MOTTA, 2015).

A fim de realizar o processo de retroanálise, previamente devem ser identificadas as espessuras das camadas do pavimento executado e os valores de Poisson dos materiais de cada camada (FERRI, 2013). Balbo (2007) menciona que as características comumente empregadas nas análises de sistemas de camadas são o módulo de elasticidade ou módulo de resiliência dos materiais de pavimentação.

Conforme Machado (2019, apud DNIT, 2006a), o módulo de elasticidade efetivo é o valor determinado por retroanálise de bacias deflectométricas obtidas por meio de equipamentos de ensaios não destrutivos. O valor do módulo retroanalisado simboliza o estado de tensões, a compactação e o tipo de carregamento impostos pelas cargas de rodas.

Para Albernaz (1997), a retroanálise é importante porque permite a avaliação estrutural comparativa entre trechos de uma mesma rodovia; fornece dados para projetos de drenagem, indicando a presença de possíveis camadas rígidas no subleito e proporciona a elaboração de projetos mais racionais e confiáveis, que se convertem em pavimentos mais duráveis e de menor custo, evitando-se assim despesas com manutenções e restaurações prematuras do pavimento.

Atualmente, encontram-se disponíveis inúmeros softwares de retroanálise para pavimentos asfálticos. No Brasil, os mais usuais são: ELMOD (para usuários do FWD, da fabricante Dynatest), KUAB (do fabricante Kuab), EVERCALC, RETRAN2C, RETRAN5L, REPAV e BAKFAA. E mais recentemente, temos o software de retroanálise que integra o novo método de dimensionamento em fase de implantação pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) no Brasil, denominado de BackMeDiNa (SOUZA JÚNIOR, 2018).

2.4.6. Métodos de avaliação estrutural do pavimento

Segundo Bernucci *et al.* (2006), existem três métodos para avaliar a condição estrutural dos pavimentos:

2.4.6.1. Método Destruutivo

Investiga-se a condição estrutural do pavimento por meio de abertura de trincheiras ou poços de sondagem, permitindo a identificação dos tipos de materiais e as espessuras de cada camada, a coleta de amostras para ensaios laboratoriais e a realização de ensaios de capacidade de carga *in situ*.

Pela própria natureza destrutiva, essa avaliação só pode ser empregada em alguns pontos para representar cada segmento a ser avaliado. A Figura 10 representa a extração de um corpo de prova do pavimento asfáltico.

Figura 10 - Exemplos de extração de um corpo de prova do pavimento asfáltico



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

2.4.6.2. Método Semidestrutivo

De acordo com Trichês *et al.* (2004), é aquele que se vale de aberturas menores de janelas de inspeção no pavimento que permitam utilizar um instrumento portátil de pequenas dimensões para avaliar a capacidade de carga de um pavimento, tal como o uso de cones dinâmicos de penetração (DCP), conforme representado na Figura 11. Esses ensaios só permitem, em geral, correlação com o Índice de Suporte Califórnia (ISC) dos materiais, com certa precisão.

Figura 11 - Exemplo de DCP de avaliação estrutural expedita de subleitos e camadas de solo



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

2.4.6.3. Método Não Destrutivo

Segundo Luz (2017), o método não destrutivo caracteriza-se por avaliar as condições do pavimento através das medidas de deflexão (deformações elásticas).

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), nos ensaios não destrutivos podem ser empregados três tipos de equipamentos: vigas de deflexão, equipamentos dinâmicos de vibração e equipamentos dinâmicos de impacto. Segundo o autor, esses equipamentos se diferem pela forma com que a carga é aplicada. As vigas de deflexão aplicam um carregamento quase estático, os equipamentos dinâmicos de vibração aplicam uma carga vibratória ou cíclica e os equipamentos dinâmicos de impacto transferem ao pavimento uma carga dinâmica de impacto.

2.4.7. Equipamentos para medida das deflexões

De acordo com Moraes (2015), com o progresso da avaliação estrutural de pavimentos, foram criadas várias técnicas e equipamentos de ensaios não destrutivos, cada

qual com suas peculiaridades. Desenvolveu-se assim, cada vez mais, o controle de qualidade dos serviços de pavimentação, desde a construção até a restauração, completa a autora.

Segundo Medina *et al.* (1994), quanto a forma de aplicação da carga, há três classes de equipamentos utilizados na avaliação estrutural não destrutiva. A seguir são apresentadas as referidas classes, bem como exemplos de equipamentos de medidas em cada uma delas:

- 1) Equipamentos de carregamento estático: Viga Benkelman, Viga Benkelman Automatizada, Ensaio de carga com placa;
- 2) Equipamentos de carregamento vibratório: *Dynaflect, Road Rater*;
- 3) Equipamentos de carregamento dinâmico: LWD, FWD.

De acordo com Nobrega (2013), métodos alternativos têm surgido com a finalidade de auxiliar na avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos, como o *Ground Penetration Radar* (GPR). O GPR ou Georadar, como também é conhecido, é um método geofísico de investigação, que basicamente consiste na emissão contínua de ondas eletromagnéticas no solo. Parte destas ondas são refletidas nas estruturas ou objetos em profundidade e os sinais são emitidos e recebidos através de uma antena disposta no equipamento que fica na superfície do terreno analisado. Os resultados dos trabalhos de investigação com o GPR representam cortes verticais do subsolo, permitindo assim individualizar a presença de materiais metálicos, topos rochosos, tubulações, cabos, cavidades, empilhamento estratigráfico e anomalias em geral.

2.4.7.1. *Light Weight Deflectometer* ou Deflectômetro de Impacto Leve (LWD)

De acordo com Elhakim; Elbaz e Amer (2014), o deflectômetro de impacto leve foi desenvolvido na Alemanha no início da década de 80 com o objetivo de obter o módulo dinâmico do solo *in situ*.

Conforme Benedetto; Tosti & Domenico (2012), este equipamento surgiu como alternativa ao FWD convencional, especialmente em situações onde se possam encontrar dificuldades de acesso aos pontos de ensaio, como em estradas ainda em construção.

Conforme Nazaal (2003), o LWD tem sido utilizado especificamente para controle de qualidade das camadas do pavimento (subleito, sub-base e base), em pavimentos novos ou em obras já existentes, para medir a deformabilidade das camadas do subleito e da infraestrutura do pavimento. O equipamento não necessita de nenhuma medida de referência e

fornecendo alternativa simples em comparação com os demais testes até então utilizados, em especial o FWD.

De acordo com Lopes (2010), este ensaio pode ser utilizado na avaliação da capacidade de carga em pavimentos e também na determinação do módulo de elasticidade de solos granulares. Segundo o autor, as principais vantagens deste equipamento estão associadas à sua mobilidade, facilidade de transporte e possibilidade de realização de ensaios em locais de difícil acesso, como trincheiras de escavação.

Apesar de apresentar estas vantagens, o seguinte conjunto de fatores pode influenciar os resultados obtidos com este tipo de equipamento:

- a) Fatores ambientais, tais como a temperatura e a umidade;
- b) Teor de água e compactação das camadas;
- c) Espessura e posição das camadas;
- d) Tipos de materiais que constituem as camadas.

Conforme Santos (2014), o LWD tem a particularidade de armazenar na sua memória interna os dados das medições, os quais podem ser transferidos para um computador através de um dispositivo de armazenamento ou por cabo, pela porta USB, e fornecer dados impressos das deflexões e módulos de elasticidade logo após a leitura de cada ensaio, cujo tempo médio de execução é de aproximadamente 3 minutos.

O equipamento pode incluir GPS (Sistema de Posicionamento Global), o qual permite identificar através de coordenadas geográficas geodésicas o ponto de realização de cada ensaio.

A Figura 12 mostra a constituição de um LWD.

Figura 12 - Constituição de um tipo de equipamento LWD



Fonte: Elhakim; Elbaz e Amer, modificado pelo autor, 2014

Marecos (Et al. 2017) comentam que a profundidade de medição do LWD é normalmente duas vezes o diâmetro da placa (30 cm) do equipamento e, por utilizar cargas mais baixas que o FWD em seu ensaio, o módulo de elasticidade obtido caracteriza somente a parte superior da estrutura do pavimento.

Ferri (2013) recomenda realizar quatro ensaios com o LWD em um mesmo ponto, desprezando-se a primeira leitura, por conta do efeito de assentamento do prato de carga no local do ensaio. O autor também recomenda refazer os ensaios onde ocorrer coeficientes de variação entre os valores pontuais superiores a 15%.

Kitareekul; Sawangsuriya e Singhatiraj (2017), em estudo realizado pelo Departamento de Transportes da Tailândia, com objetivo de reduzir a taxa de mortalidade de acidentes rodoviários e aumentar a conscientização sobre o controle de qualidade da construção de estradas e seu desempenho a longo prazo, indicam a Equação 7 para o cálculo do módulo de elasticidade da camada do revestimento asfáltico do pavimento a partir do ensaio com o equipamento LWD.

$$E = \frac{f\sigma r (1 - v^2)}{d_0} \quad (7)$$

Onde:

E: módulo de deformabilidade (MPa);

f: fator de rigidez da placa;

σ : tensão máxima de contato (MPa);

r: raio da placa (mm);

v: coeficiente de Poisson (usualmente entre 0,30 e 0,45);

d_0 : máxima deflexão da superfície no centro da placa de carregamento (mm).

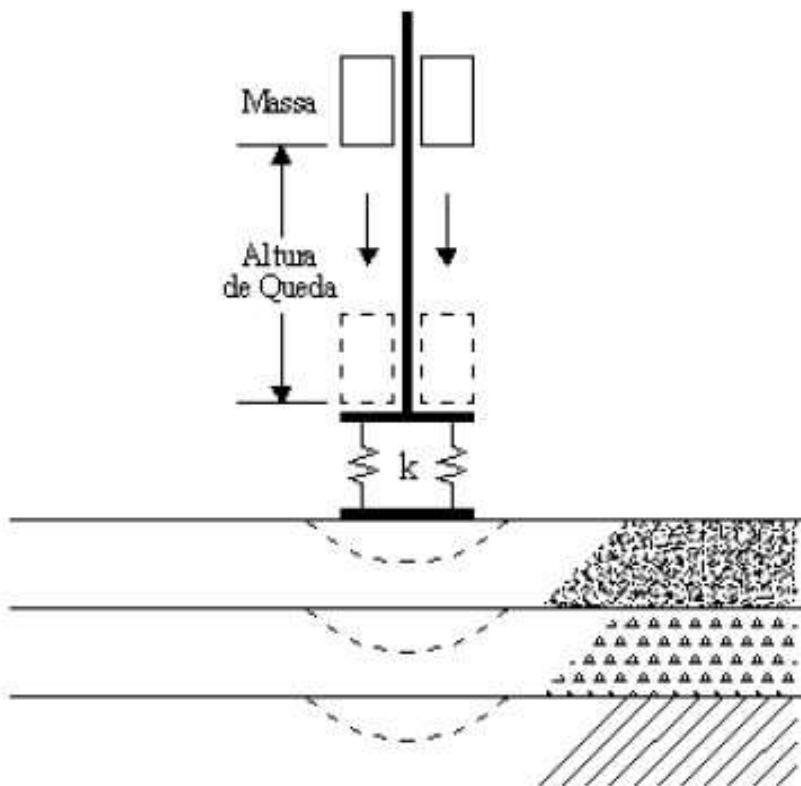
De acordo com Machado (2012), as limitações do LWD relacionam-se com o fato de não permitir a transmissão de cargas similares às dos veículos pesados, e as medições de caráter descontínuo.

2.4.7.2. *Falling Weight Deflectometer ou Deflectômetro de Impacto (FWD)*

O deflectômetro de impacto é um equipamento que permite aplicar um carregamento na superfície de um pavimento através de uma placa circular. Este equipamento estabeleceu-se mundialmente como sendo uma das ferramentas mais eficazes na medição de deflexões (SALTAN & TERZI, 2008).

Segundo Nóbrega (2003), o carregamento é transmitido ao pavimento através de uma placa de 30 cm de diâmetro. A carga é medida através de uma célula de carga e tem duração de 25 a 30 ms, tempo correspondente ao da passagem de um veículo com velocidade de 60 a 80 km/h. Esta simulação é feita através da queda de uma massa, de determinada altura, sobre um sistema de amortecedores capazes de transmitir ao pavimento um pulso de carga com formato aproximadamente igual a uma onda senoidal, conforme representada na Figura 13.

Figura 13 - Princípio de funcionamento do FWD



Fonte: Nobrega (2003)

Matematicamente, igualando-se a energia potencial da massa (antes de sua queda) com o trabalho desenvolvido pelos amortecedores de borracha (depois da queda) pode-se calcular a força de pico exercida sobre o pavimento. Essa força aplicada na placa é teórica, ou nominal, pois desconsidera o atrito. O valor da carga real aplicada ao pavimento é registrado automaticamente pela célula de carga e é função não somente da massa e da altura de queda, mas também da rigidez e temperatura do pavimento. Quanto mais rígido o pavimento, maior a carga real, para uma dada massa e altura de queda. O pico das deflexões apresenta uma defasagem em relação à carga, sendo maior quanto mais afastado estiver o medidor de deslocamento (CARDOSO, 1995).

O impacto da queda da massa atinge um sistema de amortecedores e transmite a carga a uma placa circular de 30 cm ou 45 cm de diâmetro (dependendo do aparelho) apoiada no pavimento. O valor da solicitação, ou seja, da carga real aplicada é registrado pela célula de carga (*load cell*) instalada na placa de carga (MEDINA & MOTTA, 1997).

Conforme Machado (2012), uma das vantagens do FWD é simular diferentes condições de carregamento, variando os parâmetros de ensaios, tais como a altura de queda, a massa, o número de amortecedores e, até mesmo, a dimensão da placa de carga. Outra vantagem deste equipamento é a possibilidade de obter a bacia de deflexão completa em cada ponto de ensaio.

Ainda segundo Macedo & Rodrigues (2003), pode-se citar como vantagens e limitações na utilização do FWD:

Vantagens

- a) As deflexões por ele produzidas são as que mais se aproximam das geradas por um caminhão em movimento obtido por medidas a partir de acelerômetros instalados no pavimento.
- b) Permite avaliar a não linearidade dos materiais constituintes do pavimento, através da variação da carga aplicada.
- c) Apresentam acurácia e repetibilidade em qualquer tipo de estrutura de pavimento.
- d) Registro automático da temperatura (ambiente e revestimento) e da distância do ponto medido.

Limitações

- a) A presença de uma camada rígida no subleito pode alterar a bacia de deflexões, embora também possa influenciar os resultados de quaisquer outros ensaios não destrutivos de medida de deflexões.
- b) A aceleração produzida pela carga do FWD é maior que a de uma carga de roda em movimento, podendo a inércia da massa do pavimento desempenhar um papel importante para o FWD, sendo desprezível para uma roda em movimento embora aparentemente este fato não pareça influenciar a boa concordância das deflexões medidas.
- c) Necessidade de calibração frequente.
- d) Custo de aquisição do aparelho.

De acordo com Moraes (2015), o FWD Dynatest foi o primeiro a chegar ao Brasil e trata-se um deflectômetro de impacto desenvolvido na Dinamarca e aperfeiçoadado nos EUA.

De acordo com a descrição de Macedo (1996 *apud* MORAES, 2015), o aparelho é montado sobre rodas e rebocado por veículo devidamente equipado, de capacidade média de

carga. O pulso de carga transiente é gerado pela queda de um conjunto de massas metálicas, sobre um sistema de amortecedores de borracha que transmite a carga ao pavimento através de uma placa com 300 mm de diâmetro, apoiada sobre uma membrana de borracha. Também acompanha o aparelho uma placa com 450 mm de diâmetro. Ambas podem inclinar-se em até seis graus em relação a horizontal para facilitar o ajuste à superfície do pavimento. A força aplicada ao pavimento pode variar pela modificação da altura de queda ou pela alteração da configuração do conjunto de massas utilizado. A placa circular tem uma célula de carga que mede a carga do impacto proveniente da queda do conjunto de massas. Os deslocamentos gerados na superfície do pavimento (deflexões) são medidos por 7 geofones (com capacidade máxima de medição de 2 mm) instalados na placa de carga e ao longo de uma barra metálica de 2,25 metros de comprimento, abaixada automaticamente com a placa de carga. A média diária de levantamentos deflectométricos com este tipo de equipamento é excelente, oscilando entre 500 a 700 pontos ensaiados.

Na Figura 14 estão mostrados os elementos principais deste equipamento e o detalhe de aplicação das cargas.

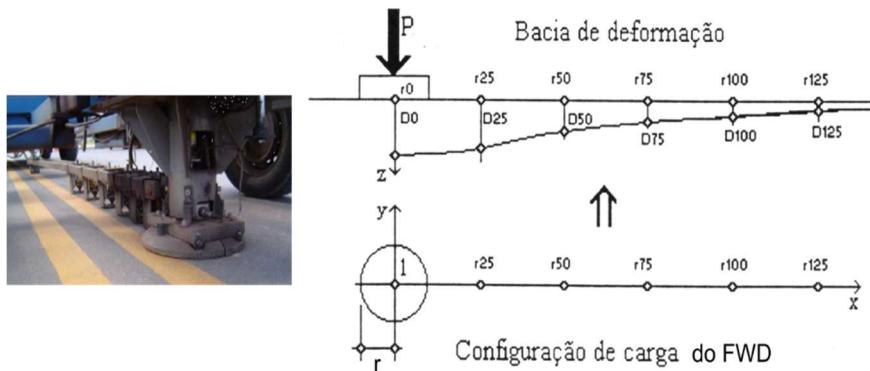
Figura 14 - Equipamento FWD em seu trailer sendo rebocado por um veículo de apoio e detalhe da parte do sistema de pesos para aplicação das cargas por impacto



Fonte: Moraes (2015)

A Figura 15 mostra detalhes da placa de aplicação da carga e dos geofones que transmitem as medidas das deflexões aferidas, bem como a bacia de deformação gerada no ponto de avaliação.

Figura 15 - Detalhes da placa e gráficos da bacia de deformação com o FWD



Fonte: Moraes (2015)

A Norma que estabelece a calibração do equipamento FWD é a DNIT 132/2010-PRO. Esta Norma foi elaborada tomando como base a norma AASHTO-R32-03 (2008/1).

O procedimento de ensaio, segundo Motta (2013), se dá da seguinte forma:

1. Move-se o trailer para o local do ensaio e posiciona-se o FWD na estação desejada, geralmente na trilha de roda externa;
2. Liga-se o microcomputador e o processador que ficam na cabine do veículo rebocador;
3. Seleciona-se a configuração de massas a ser utilizada na campanha de ensaios, fixando-a nos locais apropriados;
4. Aciona-se no microcomputador o programa que define o tipo de ensaio e comanda todas as operações, incluindo abaixamento da placa de carga e da barra de geofones, elevação dos pesos para altura de queda pré-determinada, liberação dos pesos para a queda e, finalmente a elevação da placa conjuntamente com a barra de sensores para o deslocamento do equipamento em direção ao próximo ponto de medida. A operação completa é controlada de dentro do veículo rebocador, o ensaio dura 45 segundos em média.
5. A cada golpe programado e aplicado, exibe-se em tela, na linha relativa à altura de queda, o pico de pressão na placa, a força correspondente e os picos de deflexão registrados em cada geofone. Concluída a sequência de golpes, a placa e os sensores são suspensos hidráulicamente e o sistema emite um sinal "beep" indicando que o trailer pode ser deslocado para a próxima estação de ensaio.

2.4.8. Estudos comparativos com equipamentos não destrutivos

Horak *et al.* (2008) elaboraram correlações entre os equipamentos LWD e FWD para camadas de areia tratadas com emulsão asfáltica de espessuras entre 75 a 100 mm. Os testes foram realizados em um campo experimental de Moçambique, no Continente Africano. O LWD empregado permitiu além da medição da deflexão máxima D₀, a determinação de leituras situadas a 30 e 60 cm do ponto de aplicação da carga.

As melhores correlações entre os equipamentos LWD e FWD usando a análise de regressão para os resultados dos testes obtidos (R^2) nas seções são mostradas na Tabela 2.

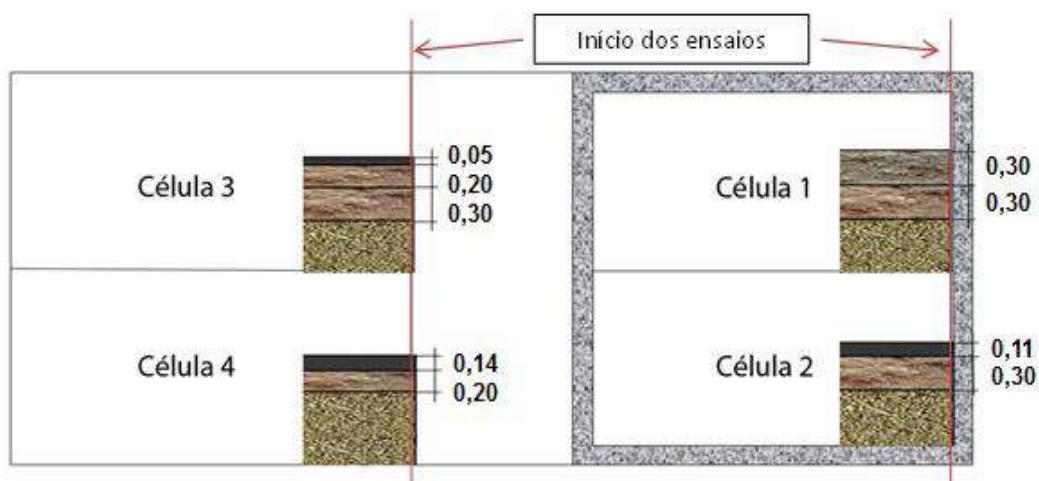
Tabela 2 - Resultados da correlação entre LWD e FWD

Deflexão	Equação de Regressão	R^2
D ₀	$D_{fwd} = 0,3617 D_{lwd}^{0,9831}$	0,62
D ₃₀	$D_{fwd} = 0,1586 D_{lwd}^{0,9281}$	0,82
D ₆₀	$D_{fwd} = 0,2353 D_{lwd}^{0,7421}$	0,67

Fonte: Horak *et al.* (2008), adaptado pelo Autor

Machado (2012) realizou ensaios com os equipamentos LWD e FWD em quatro estruturas de pavimentos flexíveis: uma em material granular (célula 1) e outras três (células 2, 3 e 4) em estruturas revestidas com diferentes espessuras de revestimento asfáltico (11, 5 e 14 cm), respectivamente, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Esquema do modelo físico das quatro células (em metros)



Fonte: Machado (2012)

De acordo com o autor, existem divergências entre os resultados das medidas de deflexão aferidas pelos equipamentos LWD e FWD. Os resultados são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Deflexões obtidas pelo LWD para a célula 2 (revestimento asfáltico de 11 cm) da Figura 16

Distância (m)	Módulos (MPa)	Leitura	Pico Força	D1	Força Normalizada	D1 Normalizada	Média	Valor a usar
			(kN)	(μm)	(kN)	(μm)		
0,90	3085,7	1	15,15	18,28	15	18,10	17,83	17,81
	3111,4	2	15,35	18,37	15	17,95		
	3136,7	3	15,35	18,23	15	17,81		
	3103,4	4	15,29	18,34	15	18,00		
	3154,5	5	15,21	17,96	15	17,71		
	3139,5	6	15,23	18,07	15	17,79		

Fonte: Machado (2012)

Tabela 4 - Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 2 (revestimento asfáltico de 11 cm) da Figura 16

Dist. (m)	D1 (μm)	D2 (μm)	D3 (μm)	D4 (μm)	D5 (μm)	D6 (μm)	D7 (μm)	D8 (μm)	D9 (μm)	Força (kN)
0,90	46	29	22	18	13	9	6	5	5	25
0,90	46	30	22	18	13	9	6	5	5	25
0,90	46	29	22	18	13	9	6	4	5	25
0,90	98	63	49	38	26	19	13	10	9	50
0,90	99	62	48	38	26	19	13	10	9	50
0,90	97	63	49	38	26	19	13	10	9	50
0,90	152	98	77	60	41	30	20	17	14	75
0,90	153	99	77	60	41	30	20	16	14	75
0,90	154	99	78	61	41	30	20	16	14	75
0,90	191	124	97	74	50	35	25	20	17	90
0,90	194	126	97	76	51	35	26	21	17	90
0,90	195	126	98	76	51	35	26	21	17	90
0,90	272	176	136	104	69	48	34	27	22	120
0,90	277	178	138	105	69	48	35	28	22	120
0,90	281	180	139	106	69	49	35	28	22	120

Fonte: Machado (2012)

Da comparação entre os valores de deflexões obtidos com os dois equipamentos concluiu-se que poderá ser utilizado o LWD, em substituição ao FWD, no caso em que o acesso deste último não seja possível, ou não esteja disponível, principalmente para baixos carregamentos, de 25 kN. Os erros obtidos desta comparação foram abaixo de 2%,

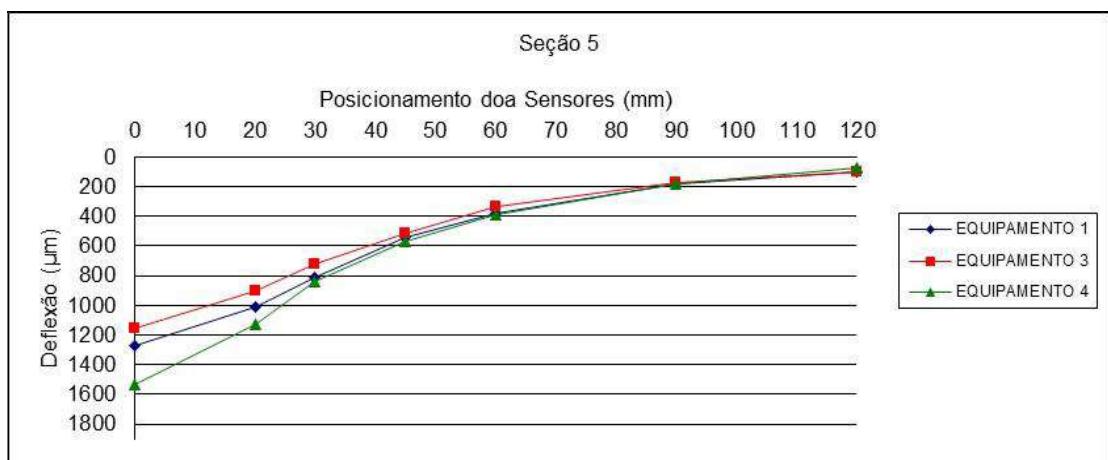
considerando-se que podem ser desprezados. A estrutura com material granular indicou maiores erros, possivelmente devido ao assentamento dos geofones na superfície desta camada.

A análise de bacias deflectométricas obtidas mediante o emprego de quatro equipamentos do tipo FWD (três modelos Kuab e um modelo Dynatest) foi realizada por Moraes (2015). As medições foram realizadas em trechos das principais avenidas da Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e em trechos do Arco Metropolitano do Rio de Janeiro.

Entre as principais conclusões da autora destacam-se as divergências encontradas entre bacias de deflexão de um equipamento para outro, a necessidade de calibração periódica e a verificação de que um sensor descalibrado afeta significativamente a bacia de deflexão registrada.

Na Figura 17 são apresentadas algumas bacias deflectométricas para uma determinada seção de levantamento (Seção 05) realizadas pelos equipamentos 1 (Modelo KUAB 2M-FWD, fabricante Kuab, ano 2012), 3 (Modelo KUAB 150, fabricante Kuab, ano 2011) e 4 (Modelo 8002, fabricante Dynatest, ano 2009). Nesta seção, ao se compararem as deflexões medidas, verificou-se instabilidade no sensor D_0 do equipamento 4 (pois as deflexões ficaram muito maiores que as demais) com as medidas registradas pelos equipamentos 1 e 3. Nota-se que nos demais sensores os valores registrados ficaram mais próximos.

Figura 17 - Medidas divergentes de deflexões entre os pontos 01 e 04

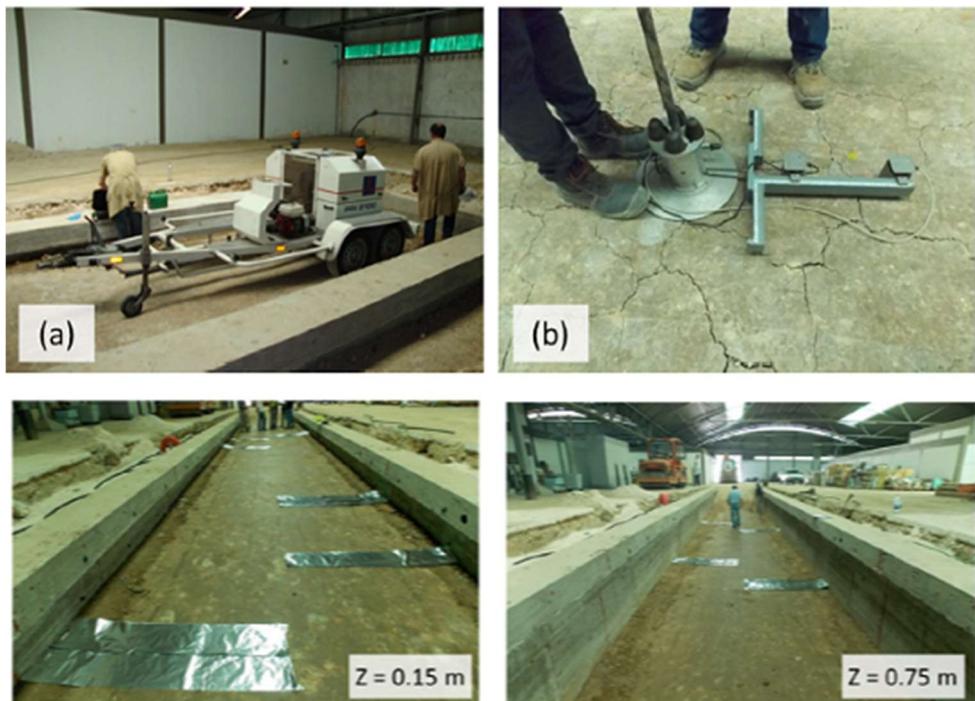


Fonte: Moraes (2015)

Marecos et al. (2017), apresenta uma abordagem integrada para a análise da condição do subleito combinando diferentes técnicas de ensaios não destrutivos (LWD *versus* FWD).

Neste estudo, os testes foram conduzidos em uma pista em escala real, construída para simular as camadas da fundação do pavimento que consistem em subleito de solo argiloso, frequentemente usado em países africanos, de acordo com a Figura 18.

Figura 18 - Equipamentos FWD e LWD e pista de teste em escala real



Fonte: Marecos et al (2017)

A deformação vertical no centro da placa foi medida com um geofone e usado para determinar o módulo de elasticidade com o equipamento FWD, conforme indica a Equação 08.

$$E = \frac{A(1 - \nu) \times R \times P}{D} \quad (08)$$

Onde:

ELWD: módulo de deformabilidade (MPa);

A: é um fator de distribuição de tensão ($A = p / 2$ para tensão uniforme distribuição, $A = 2$ para distribuição inversa do estresse parabólico ou $A = 3p / 2$ para distribuição do estresse parabólico);

R: raio da carga placa (mm);

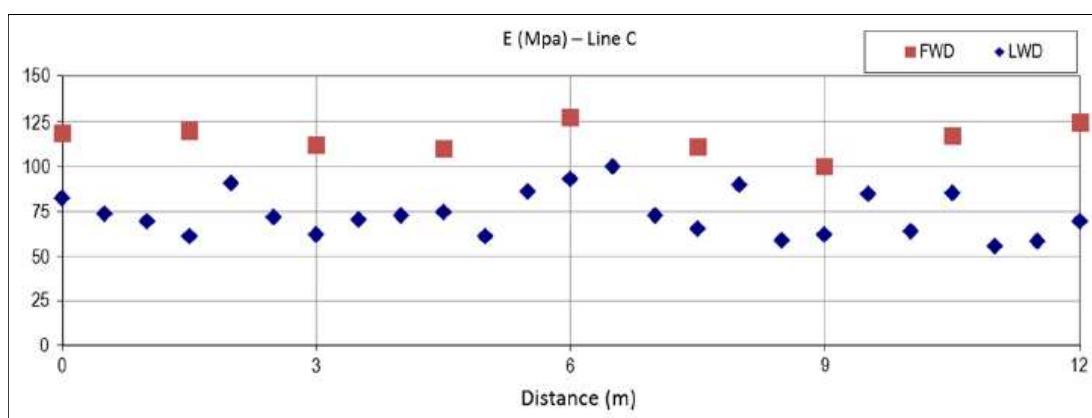
P: pico de pressão aplicada (MPa);

D: pico vertical deflexão (mm);

ν : coeficiente de Poisson.

O módulo de elasticidade determinado pelo LWD mostrou maior variação dos valores (entre 50 e 100 MPa, conforme os pontos representados em azul, no gráfico da Figura 19). Isso pode ser explicado devido às rachaduras existentes causadas pela retração da argila. Por outro lado, os resultados de módulo determinados a partir das bacias de deflexão aferidas pelo FWD forneceram resultados com menor variação (valores entre 100 e 125 MPa) e ainda apresentam informações quanto ao comportamento de camadas profundas do pavimento.

Figura 19 - Módulos de elasticidade do LWD e FWD para a linha C



Fonte: Marecos *et al.* (2017)

Segundo o estudo, concluiu-se que o LWD é mais apropriado na avaliação da camada superficial e na detecção de heterogeneidades locais, enquanto o FWD é mais apropriado para a avaliação estrutural do pavimento geral.

A segurança rodoviária na Tailândia foi relatada como a segunda maior taxa de mortalidade rodoviária do mundo, conforme estudo de Jitareekul *et al.* (2017). Em virtude disso, o Ministério dos Transportes promoveu políticas para redução de acidentes de trânsito nas estradas do país, e uma destas foi aumentar a conscientização pelo controle de qualidade da construção de estradas e seu desempenho a longo prazo.

Neste estudo, uma série de testes com o LWD foi realizada em camadas compactadas em 11 locais de construção de rodovias na Tailândia, em quatro tipos principais de materiais de pavimentação comumente usados na construção de rodovias, incluindo base de rocha britada, base de solo granular, materiais de reforço e subleito de vários locais de construção.

Uma dispositiva PRIMA 100 LWD fornecido pela Sweco, da Dinamarca, foi utilizado neste estudo. Conforme os autores, antes do teste a placa de carregamento deve estar firmemente assentada no solo para o contato adequado da placa com a superfície do solo. Para

isso, uma fina camada de areia (ou seja, 2-3 mm de espessura) foi colocada na superfície do solo para garantir um contato nivelado e distribuição uniforme de carregamento de impacto. Na sequência, uma carga de impulso foi aplicada seis vezes na placa de carga; as três primeiras cargas foram consideradas para o assentamento da estrutura e as três seguintes foram usadas para calcular o módulo de elasticidade da camada de pavimento. Os detalhes do método e procedimento realizado foi de acordo com ASTM E2583-07.

A Tabela 5 resume as configurações do teste com o LWD para as camadas dos pavimentos analisados.

Tabela 5 - Resumo das configurações dos testes com o LWD

Camada do pavimento	Carga da placa (kg)	Diâmetro da placa (mm)	Altura de queda (mm)
Base de rocha britada	10	100	300
Sub-base de solo granular	10	100	100
Reforço do subleito	10	100	50
Subleito	10	200	50

Fonte: Adaptado de Jitareekul *et al.* (2017)

Uma série de dados foi coletada com o LWD em, pelo menos, quatro locais para cada tipo de material de pavimento. Uma variedade de medidas de deflexão e módulos de elasticidade foram obtidos a partir dos testes. Na Tabela 6 são apresentados alguns valores estatísticos destas medições, tais como média, desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV).

Os coeficientes de variação dos valores dos módulos do LWD de todos os materiais testados estavam na faixa de 58 a 77% e de 49 a 65%, respectivamente. Na camada do subleito foram encontrados os maiores valores para o coeficiente de variação, enquanto os valores mais baixos foram encontrados na base de rocha britada. Os valores do módulo de elasticidade para a camada de base de rocha britada, sub-base de solo granular, material selecionado (reforço) e subleito, correspondente a uma compactação relativa de 95%, estavam em uma faixa de 170 a 1794 MPa, 64 a 730 MPa, 106 a 1215 MPa e de 34 a 738 MPa, respectivamente.

O alto valor do coeficiente de variação da deflexão da superfície e o módulo de elasticidade medido a partir do teste LWD pode ser devido à variabilidade do local de teste, material, configuração de teste, teor de umidade, densidade, bem como espessura compactada.

Tabela 6 - Resumo dos resultados do teste com o LWD

Material	Número do teste	D0 (mm)	X (mm)	σ (mm)	CV (%)	Elwd (Mpa)	X (mm)	σ (mm)	CV (%)
Base de rocha britada	52	0,025-0,255	0,087	0,051	58	170-1794	693	399	58
Sub-base de solo granular	80	0,027-0,382	0,110	0,068	62	64-730	287	141	49
Reforço do subleito	114	0,009-0,142	0,044	0,025	57	106-1215	404	227	56
Subleito	81	0,013-0,345	0,067	0,052	77	34-738	200	131	65

Fonte: Adaptado de Jitareekul *et al* (2017)

Onde:

D0: deflexão no ponto de aplicação da carga;

X: média das deflexões;

 σ : desvio padrão

CV: coeficiente de variação;

Elwd (Mpa): módulo de elasticidade do LWD

Rodrigues (2018) realizou estudo comparativo entre medidas de deflexão realizadas com Viga Belkeman, ensaio de carga com placa e com o LFWD (Light Falling Weight Deflectometer), em quatro trechos de pavimentos asfálticos urbanos, no município de Joinville. Os tipos dos materiais, as espessuras das camadas constituintes das estruturas dos pavimentos analisados e as estações dos ensaios estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 - Estruturas selecionadas e estações de ensaio

TIPO DE ESTRUTURA	REVESTIMENTO		LIGAÇÃO		BASE		SUB-BASE		REFORÇO		N. de ESTAÇÕES
	Tipo	Esp.média (cm)	Tipo	Esp.média (cm)	Tipo	Esp.média (cm)	Tipo	Esp.média (cm)	Tipo	Esp.média (cm)	
SEGMENTO 1	CAUQ	5,00	CAUQ	5,00	BG	15,00	MS	20,00	PP	30,00	8 21%
SEGMENTO 2	CAUQ	5,00	-	-	BG	15,00	MS	30,00	-	-	10 26%
SEGMENTO 3	CAUQ	3,50	PMQ	5,00	PAR	VAR	-	-	-	-	10 26%
SEGMENTO 4	CAUQ	5,00	-	-	BG	15,00	SB	38,00	-	-	10 26%
TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38 100%

Fonte: Rodrigues (2018)

Onde:

CAUQ: Concreto asfáltico usinado a quente;

PMQ: Pré-misturado a quente;

BG: Brita graduada;

PAR: Paralelepípedo;

MS: Macadame seco;

SB: Saibro bruto;

PP: Pedra pulmão.

Segundo o autor, o uso do LFWD é relativamente recente em relação à avaliação estrutural de pavimentos urbanos e apresenta vantagens em relação aos métodos tradicionais, como a rapidez, simplicidade das medições e também por permitir a avaliação dos pavimentos sem grande perturbação do tráfego.

De acordo com o autor, o mesmo equipamento não apresenta boa correlação entre as medidas de deflexões (com os ensaios de Viga Belkeman e de carga com placa) em estruturas onde há camadas de revestimento asfáltico com espessuras de 10 cm, ou em revestimentos sobre paralelepípedos (Segmento S-03). A Tabela 8 apresenta os resultados das deflexões obtidas com Viga Benkelman, placa e LWD para o segmento 3 (Rua Piratuba).

Tabela 8 - Resultados das deflexões obtidas com Viga Benkelman, placa e LFWD para o segmento 3 (Rua Piratuba)

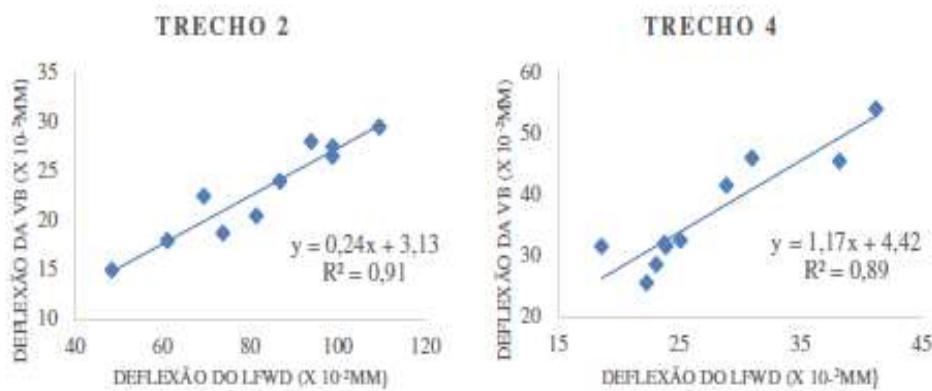
SEGMENTO	ENSAIO	Deflexão Máx. da Viga Benkelman ($\times 10^{-3}$ mm)	Temp. do ar (°C)	Data	Deflexão Máx. Carga com Placa ($\times 10^{-3}$ mm)	Temp. do ar (°C)	Data	Deflexão Máx. do LFWD ($\times 10^{-3}$ mm)	Temp. do ar (°C)	Data
S-03	E-19	65,12	26	18/01/18	139,34	30	12/03/18	28,10	27	25/01/18
S-03	E-20	56,77	26	18/01/18	110,00	30	12/03/18	18,60	27	25/01/18
S-03	E-21	39,26	26	18/01/18	99,53	30	12/03/18	21,90	27	25/01/18
S-03	E-22	52,57	26	18/01/18	108,96	30	12/03/18	19,20	27	25/01/18
S-03	E-23	78,29	26	18/01/18	174,96	30	12/03/18	26,60	27	25/01/18
S-03	E-24	66,74	26	18/01/18	118,39	30	12/03/18	16,40	27	25/01/18
S-03	E-25	51,07	26	18/01/18	91,15	30	25/05/18	27,70	27	25/01/18
S-03	E-26	80,32	26	18/01/18	98,48	30	12/03/18	71,10	27	25/01/18
S-03	E-27	66,86	26	18/01/18	125,72	30	12/03/18	20,90	27	25/01/18
S-03	E-28	78,29	26	18/01/18	139,34	30	12/03/18	40,10	27	25/01/18
Média ($\times 10^{-3}$mm)		63,53			120,59			29,05		
Desvio ($\times 10^{-3}$mm)		13,55			25,25			16,27		
Característica ($\times 10^{-3}$mm)		77,08			145,83			45,32		
Máximo ($\times 10^{-3}$mm)		80,32			174,96			71,10		
Mínimo ($\times 10^{-3}$mm)		39,26			91,15			16,40		
Coeficiente de Variação (%)		21,33%			20,94%			56,02%		
Amostra		10,00			10,00			10,00		

Fonte: Rodrigues (2018)

No entanto, na comparação dos resultados obtidos dos ensaios de Viga Belkeman e do LFWD, houve boa relação linear em estruturas compostas por revestimento asfáltico delgado ($R^2 = 0,91$ e $R^2 = 0,89$), as quais são compostas por uma camada de 5 cm de CBUQ.

Na Figura 20 estão representados, na forma gráfica, os valores de deflexão medidas com a Viga Belkeman e o LFWD nos Trechos 2 e 4 (revestidos por camadas de 5cm de CBUQ) e, ainda, a reta obtida pela regressão linear ($DVB = a \times D_{LWD} + b$) entre as referidas medidas.

Figura 20 - Regressão linear entre LFWD x Viga Benkelman para os trechos 2 e 4



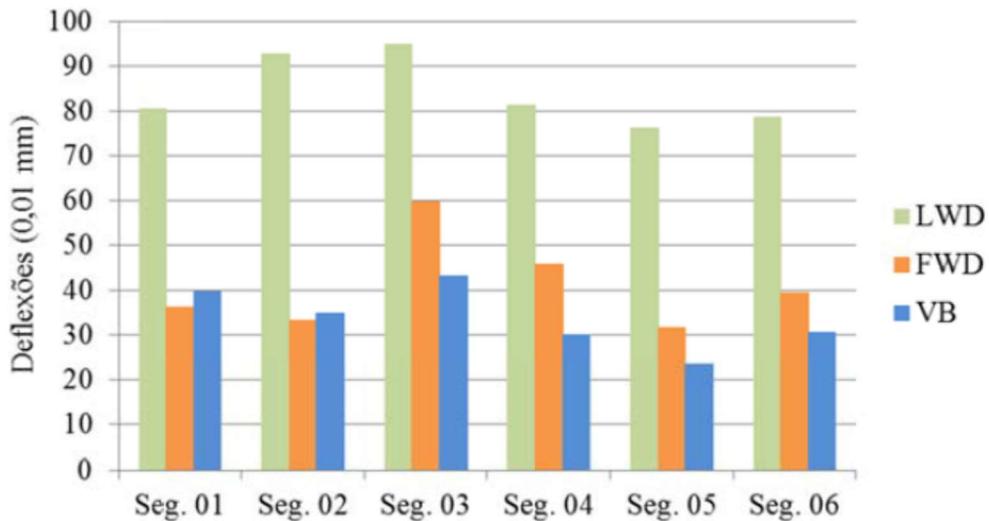
Fonte: Rodrigues *et al.* (2020)

Nery (2020) realizou ensaios em 110 pontos de testes na Rodovia Rio do Morro, situada entre os municípios de Joinville e Araquari, na região Norte do Estado de Santa Catarina, com os equipamentos LWD, FWD e Viga Belkeman. O estudo visou comparar as leituras de deflexão e os módulos de elasticidade equivalentes obtidos por retroanálise e a avaliação da estrutura do pavimento através do Método MeDiNa.

A escolha dos locais esteve relacionada com duas estruturas de pavimentação, sendo a denominada Estrutura 01 composta por reforço do subleito em areia e a Estrutura 02 composta por reforço em pedra pulmão, em espessura de no mínimo 50 cm. As demais camadas do pavimento são semelhantes, sendo 30 cm em sub-base de macadame seco, 18 cm em base de brita graduada simples e 5 cm de revestimento asfáltico em CBUQ (CAP 50/70).

A Figura 21 ilustra o comparativo entre as deflexões médias obtidas pelos equipamentos do estudo para os seis segmentos analisados na pesquisa.

Figura 21 - Comparativo entre deflexões médias com LWD, FWD e Viga Benkelman



Fonte: Nery (2020)

De acordo com a autora, considerando-se as leituras realizadas por um mesmo equipamento, a maior variação entre as deflexões médias dos segmentos foi de 28 (0,01 mm). As menores deflexões foram aferidas para o segmento 05, o qual possui reforço do subleito em areia e foi pavimentado há 5 anos. As maiores deflexões foram obtidas para o segmento 03, também executado com reforço em areia, mas com execução recente, possivelmente por situar-se em processo de consolidação das deflexões, conforme explicado e demonstrado através da Figura 3 desta dissertação. Não se verificou uma tendência para maior ou menor valor das deflexões D0 em função do tipo de reforço do subleito de cada segmento, seja com areia ou com pedra pulmão.

Segundo a autora, os maiores valores de deflexão foram verificados para as leituras com o LWD e os valores inferiores foram obtidos com a viga Benkelman. Os valores de deflexão foram próximos entre as leituras realizadas com o FWD e a viga Benkelman. Ao contrário, as leituras com o LWD resultaram em valores mais distantes das leituras realizadas com os demais equipamentos.

2.4.9. Dimensionamento da camada de reforço do pavimento asfáltico

De acordo com Fonseca (2013), as características estruturais e funcionais de um pavimento podem ser recuperadas através da aplicação de uma camada betuminosa adicional sobre o revestimento remanescente prolongando a vida útil do pavimento, este procedimento é chamado de reforço da camada de rolamento.

Para Souza Junior (2018), o dimensionamento de um pavimento tem como objetivo calcular e/ou verificar espessuras e compatibilizar os materiais de forma que a vida útil do mesmo corresponda a um determinado número projetado de solicitações de carga.

Conforme Franco (2008), o dimensionamento adequado de um pavimento asfáltico visa assegurar que a repetição da passagem dos eixos dos veículos não causará o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga dentro do período de vida de projeto e, também, garantir que as espessuras das camadas de sua estrutura sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda (acúmulo excessivo de deformação permanente), considerando a compatibilidade entre a deformabilidade dos materiais.

De acordo com Pinto e Preussler (2010), até 1960, a abordagem para dimensionamento do reforço de um pavimento considerava a experiência regional e o critério da resistência (deformações permanentes).

Segundo Pinto e Preussler (2010 *apud* SOUZA JUNIOR, 2018), com o desenvolvimento de equipamentos e programas que fornecem informações sobre as características elásticas dos materiais que constituem o pavimento, nos meados da década de 1970, iniciou-se a introdução dos métodos mecanísticos ou analíticos fundamentados na análise de tensões e deformações *nas* camadas. Com o desenvolvimento dos sistemas de gerência de pavimentos nos anos 1980, começaram as metodologias de reforço que se fundamentam em modelos de previsão de desempenho e que procuram analisar diversas estratégias de intervenção visando diminuir o custo de ciclo de vida do pavimento.

Conforme Fritzen (2016), no atual cenário brasileiro e mundial, os métodos de dimensionamento empíricos vêm perdendo espaço no projeto de pavimentos novos ou restaurados, sendo que vários países têm utilizado métodos de dimensionamento mecanístico com certa dose de empirismo. O método é dito mecanístico quando utiliza a teoria da elasticidade para prever as tensões e deformações na estrutura do pavimento em função da ação do tráfego e do clima. A parcela de empirismo está relacionada aos fatores de ajuste entre campo e laboratório.

De acordo com Fonseca (2013), têm-se hoje no Brasil, além do MeDiNa, outros quatro métodos homologados pelo DNIT para dimensionamento de reforço de pavimentos, que são:

- DNER PRO 10/79 – Procedimento A
- DNER PRO 11/79 – Procedimento B

- DNER PRO 159/85
- DNER PRO 269/94 – TECNAPAV

Os métodos A, B e TECNAPAV apresentam uma proposta de dimensionamento baseada na deflexão máxima do pavimento no período de levantamento de campo em relação a deflexão máxima que se projeta para o tráfego futuro que utilizará o pavimento. Já o método PRO 159/85, considera como principais parâmetros: o trincamento e o quociente de irregularidade.

De acordo com Souza Junior (2018), o novo método de dimensionamento mecanístico-empírico proposto pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e, denominado MeDiNa, realiza o dimensionamento do reforço do pavimento com base na deformabilidade dos materiais, na curva de fadiga do material de reforço e na previsão de trincamento. Conforme o autor, esse tipo de análise permite ainda a avaliação qualitativa do uso de novos materiais, carregamentos diferentes dos normalmente utilizados, configurações de rodas diferentes e outros fatores que influenciam o desempenho dos pavimentos.

Segundo Almeida *et al.* (2015 apud MACHADO, 2019), apesar de o MeDiNa possibilitar uma abordagem mais racional da estrutura do pavimento, seu modelo teórico terá sempre que ser calibrado com dados de trechos experimentais, correlacionando suas respostas ao desempenho das estruturas reais.

2.4.10. Método MeDiNa

Durante muito tempo, desde a década de 1950, o principal parâmetro para a avaliação estrutural e dimensionamento de reforço do pavimento foi a deflexão máxima sob a carga das rodas. No entanto, a partir da década de 1970, houve o reconhecimento de que somente as deflexões máximas não eram suficientes para avaliar a estrutura do pavimento (FONSECA, 2013; MEDINA e MOTTA, 2015).

Franco (2007) desenvolveu um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), utilizando a análise elástico linear e a elástico não linear, sendo os danos estimados por modelos de previsão de fadiga, deformação permanente e deformação máxima admissível no topo do subleito. Para

permitir a calibração, validação e, posteriormente, seu uso, o método foi consolidado em um *software* computacional denominado SisPav.

Em 2013, uma versão atualizada foi denominada de SisPavBR, e através do Termo de Execução Descentralizada celebrado de 2015 a 2018 entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e a COPPE/UFRJ, o mesmo foi denominado de Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). O método recebeu o acrônimo de Medina em homenagem ao professor titular aposentado da COPPE/UFRJ, Jacques de Medina.

De acordo com Fonseca (2013), este método apresenta-se como uma boa proposta de substituição dos quatro métodos normalizados pelo DNIT até então, e citados anteriormente.

Conforme Franco (2018), o MeDiNa é um software que realiza a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos por meio da rotina da “Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC)”. Segundo o autor, esta rotina calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos sob carregamento de rodas do tipo eixo padrão rodoviário e aplica modelos de avaliação de desempenho por fissuração por fadiga e deformação permanente para ajustar as espessuras das camadas.

Para Souza Junior (2018), o MeDiNa realiza o dimensionamento de reforço da estrutura do pavimento com base na deformabilidade dos materiais, da curva de fadiga do material do reforço e na previsão de trincamento, sendo os módulos de elasticidade das camadas obtidos por retroanálise das bacias de deflexão.

Segundo (KNABBEN; CARPIO, 2020), os resultados dessa análise são utilizados para prever o comportamento da estrutura durante a sua vida útil e garantir o seu bom desempenho quanto aos dois principais problemas recorrentes nos pavimentos brasileiros, que são o trincamento do revestimento por fadiga e a deformação permanente. De acordo com os autores, o MeDiNa pode ser empregado no dimensionamento de novos pavimentos (nível A) e no dimensionamento de reforço de pavimentos (Modo Reforço). O *software* compreende dois módulos adicionais, sendo: i) BackMeDiNa: utilizado para a retroanálise e determinação dos módulos equivalentes retroanalisados das camadas do pavimento e ii) AEMC: módulo destinado à análise elástica de múltiplas camadas.

2.4.10.1. Funções de Transferência

Fritzen (2016, apud NERY, 2020) explica que os ensaios de laboratório, tais como: fadiga, módulo de resiliência (Mr), resistência à tração (RT), deformação permanente, entre

outros, permitem avaliar os materiais que irão compor a estrutura do pavimento nas condições de campo. A “Função de Transferência” (FT) ou “Fator Campo Laboratório” é a correlação ou o fator de ajuste entre os resultados de laboratório para as propriedades dos materiais e o desempenho observado e monitorado em campo.

Segundo (Franco e Motta, 2018 apud NERY, 2020), a calibração dos danos por fadiga em termos de área trincada foi realizada com base na tese de Fritzen (2016) e atualizada posteriormente para inserção no MeDiNa. Inicialmente, foi necessário identificar e definir matematicamente qual a melhor curva sigmoidal que representasse o comportamento da evolução da área trincada dos segmentos monitorados em função do número N relacionado ao tráfego. O número N foi ajustado através da multiplicação por fatores de deslocamentos, de forma aleatória até minimizar o erro entre a evolução da área trincada com a curva sigmoide padrão. Na sequência, foi necessário correlacionar os dados de área trincada com a informação estrutural do pavimento, no caso o dano médio por fadiga, calculado através da média entre os danos em 10 pontos da superfície e 10 pontos na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico. Por fim, foi atualizada a Função de Transferência que correlaciona o fator de deslocamento (fs) com o dano médio em 20 pontos da área trincada prevista (Dmédio), através da Equação 09, obtendo-se um coeficiente R^2 de 0,8743:

$$fs = 1.993,7 \times (Dmédio)^{0,3737} \quad (09)$$

Onde:

fs = fator de deslocamento;

Dmédio = dano médio por fadiga em 20 pontos da área trincada prevista.

2.4.10.2. Retroanálise com o Software BackMeDiNa

O software BackMedina é uma ferramenta de rotina do método MeDiNa, que se deu da evolução do SisPav desenvolvido na tese de doutorado de FRANCO (2007). O programa permite retroanalisar as bacias deflectométricas obtidas por FWD com objetivo de inferir o módulo equivalente retroanalisado *in situ* das camadas do pavimento.

De acordo com Franco (2018), o cálculo para se determinar esses módulos é feito de forma iterativa, utilizando o módulo AEMC para a análise elástica linear, a partir da variação dos valores dos módulos em torno de um valor central, até se obter uma bacia teórica próxima da bacia de deflexões de campo medida pelo FWD. Para isso, o programa compara a raiz do

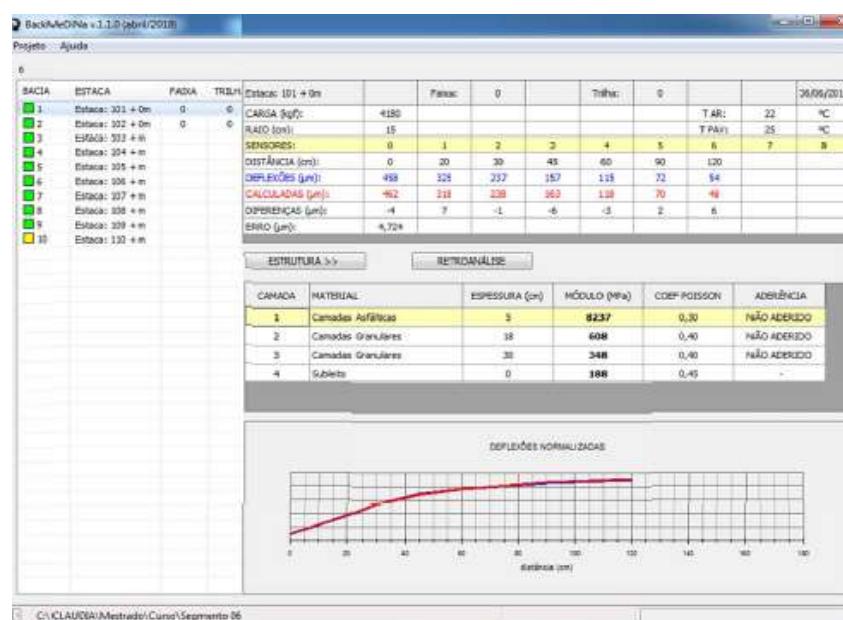
valor quadrático médio das diferenças entre as medidas de deflexões de campo e as calculadas.

No atual módulo de retroanálise do método BackMeDiNa (versão 1.2.0, de julho/2020), pode-se importar arquivos com informações referentes à seção do pavimento sobre o qual foi realizado o levantamento de campo, além dos dados coletados no levantamento deflectométrico.

De acordo com Franco e Motta (2018), o erro da retroanálise é calculado pelo método da raiz do valor quadrático médio ou RMS. Quando o erro é superior a 10 μm , o programa marca a seção com a cor vermelha, indicando não haver uma retroanálise satisfatória. 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 uma correlação razoável. Quando o erro é inferior a 5 μm , a cor é verde e a há o indicativo de que a retroanálise conseguiu uma boa correlação.

A Figura 22 apresenta o *software* BackMedina depois de importado o arquivo com as bacias deflectométricas. No próprio *software* é determinado o número de camadas, sua espessura e demais parâmetros da interface, como a aderência. O *software* também indica um valor de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson pelo tipo de material informado, que pode ser alterado pelo usuário.

Figura 22 - Exemplo de uma tela do software de retroanálise BackMeDiNa



Fonte: Nery (2020)

2.4.10.3. Estrutura do Pavimento, Composição do Tráfego e Curvas de Fadiga

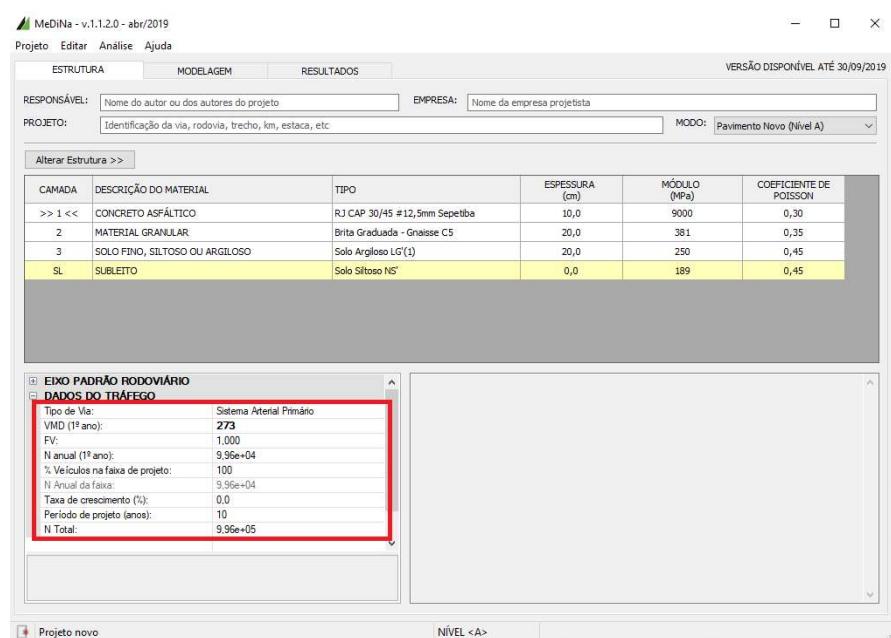
As primeiras informações que devem ser preenchidas são de identificação do projeto, nos campos: Responsável, Projeto e Empresa. A determinação da estrutura a ser analisada é realizada adicionando ou excluindo camadas, definindo o material que as compõem, espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de cada camada (FRANCO, 2018).

Na versão do MeDiNa utilizada para as análises da vida útil e dimensionamento do reforço, os módulos retroanalisados podem ser importados do BackMeDiNa e, durante a importação, o MeDiNa calcula a média, o desvio padrão e os valores mínimos e máximos dos módulos retroanalisados, assim como o valor da deflexão característica. Os módulos considerados para as análises e dimensionamentos de reforço é a média dos módulos de todas as bacias retroanalisadas consideradas para o trecho.

Segundo (KNABBEN; CARPIO, 2020), concluída a caracterização da estrutura, deve ser informada ao programa a composição do tráfego, sendo inseridos os dados referentes a: tipo de via, VMD (volume médio diário) referente ao primeiro ano, fator de veículo, “N” anual total, porcentagem de veículos na faixa de projeto, taxa de crescimento do tráfego ao ano e vida de projeto.

A partir dos parâmetros informados o *software* calcula o valor de número “N” final, correspondente ao período de projeto, conforme detalhe em vermelho na Figura 23.

Figura 23 - Dados do tráfego



Fonte: Knabben; Carpio (2020)

De acordo com Knabben e Carpio (2020), o projetista deverá definir o tipo de via que será dimensionada. Essa escolha está relacionada com o grau de confiabilidade e critérios de parada do dimensionamento. A Tabela 9 apresenta o critério de parada do dimensionamento de acordo com o tipo de via.

Franco e Motta (2018, apud NERY, 2020) destacam que os parâmetros do tráfego são de extrema importância para o correto funcionamento do *software* MeDiNa, visto que os modelos de avaliação de desempenho (curva de fadiga) são sensíveis a pequenas variações do número de repetições do eixo padrão de 8,2 tf.

Tabela 9 - Grau de confiabilidade e critérios de parada do dimensionamento

Tipo de Via	Confiabilidade	Área Trincada	Deformação Permanente
Sistema arterial principal	95 %	30%	10 mm
Sistema arterial primário	85%	30%	13 mm
Sistema arterial secundário	75%	30%	20 mm
Sistema coletor primário	85%	30%	13 mm
Sistema coletor secundário	75%	30%	20 mm
Sistema local	65%	30%	20 mm

Fonte: Nery (2020), adaptado pelo Autor

Segundo Franco e Motta (2020), “a curva de fadiga das misturas asfálticas é obtida a partir de ensaios de carregamento repetido, à tensão constante, usando o ensaio de compressão diametral de tração indireta”. A Equação 10 apresenta o modelo genérico de fadiga utilizado no software Medina.

$$N_{fadiga} = k_1 \times \varepsilon t^{k_2} \quad (10)$$

Onde:

N_{fadiga} = número de ciclos;

εt = deformação específica resiliente de tração;

k_1 e k_2 = parâmetros da curva de fadiga.

Souza Júnior (2018) e Lopes (2019) informam que quatro misturas asfálticas teóricas se encontram na base de dados do MeDiNa, denominadas Classe 1, Classe 2, Classe 3 e Classe 4, onde a mistura Classe 1 é considerada menos resistente à fadiga e a mistura Classe 4 mais resistente. Conforme Flores e Specht (2019), as classes de misturas asfálticas abrangem uma ampla faixa de parâmetros de fadiga, variando o módulo de resiliência de 5.764 MPa na Classe 1 até 10.492 MPa na Classe 4. A Tabela 10 apresenta o módulo de resiliência e os parâmetros do modelo de fadiga para cada classe de misturas asfálticas.

Tabela 10 - Características das misturas asfálticas teóricas: classe 1 a 4

Classe	Módulo de Resiliência (Mpa)	Parâmetro k1	Parâmetro k2	Tráfego
1	5764	$5,496 \times 10^{-11}$	-3,253	$4,5 \times 10^6$ a $6,0 \times 10^6$
2	6743	$1,11 \times 10^{-13}$	-3,979	$6,0 \times 10^6$ a $7,5 \times 10^6$
3	8000	$1,0 \times 10^{-12}$	-3,75	$7,5 \times 10^6$ a $1,0 \times 10^7$
4	10492	$1,91 \times 10^{-5}$	-1,90	Superior a $1,0 \times 10^7$

Fonte: Nery (2020) , adaptado pelo Autor

Para o dimensionamento, o MeDiNa estabelece duas condições na interface entre as camadas do pavimento: “não aderida” e “aderida”. O programa traz pré-definida a condição “aderida” para três situações (FRANCO; MOTTA, 2018, 2020), conforme Tabela 11:

Tabela 11 - Considerações para uso de camada aderida

Camada Aderida	a) camada asfáltica sobre outra camada asfáltica;
	b) camada asfáltica sobre camada antirreflexão de trincas;
	c) tratamento superficial sobre camadas asfálticas.

Fonte: O autor

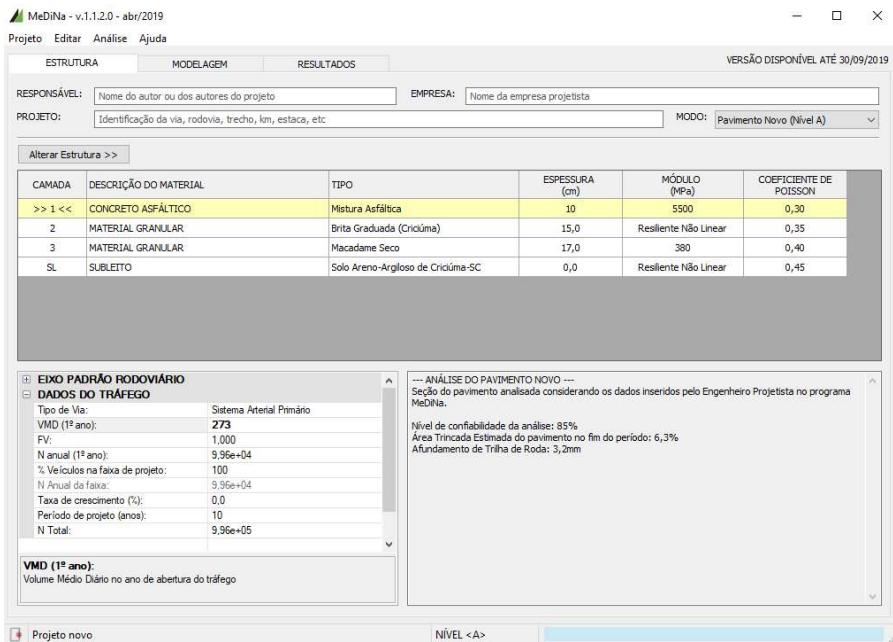
Para Bueno (2016), quando se consideram as condições aderidas identifica-se distribuição gradual dos esforços ao longo da estrutura, exigindo menores valores de rigidez dos materiais para ajustar a bacia deflectométrica teórica à de campo. Para a condição não aderida, o diagrama de tensões é distribuído de uma forma diferente entre as camadas da estrutura, exigindo, em um programa de retroanálise de módulos de resiliência, maior rigidez dos materiais para adequar a bacia de deflexões teórica (simulada pelo programa) àquela

medida em campo. Este fato explica a diferença nos valores encontrados para os módulos de resiliência quando são consideradas estas duas situações.

Depois de concluída a entrada dos dados é possível salvar o projeto, ação que preserva todos os dados informados, podendo ser aberto a qualquer momento pelo projetista para que sejam efetuadas alterações, novas análises e dimensionamento de camadas. Com o preenchimento de todos os dados o usuário pode analisar a vida útil do pavimento inserido, dimensionar uma camada de reforço no modo reforço ou dimensionar as camadas da estrutura do pavimento de acordo com o tráfego previsto (FRANCO, 2018).

A Figura 24 mostra um exemplo da tela de entrada do MeDiNa, após a análise de dimensionamento para um pavimento novo.

Figura 24 - Análise realizada pelo software para a estrutura proposta



Fonte: Knabben; Carpio (2020)

2.4.10.4. Modo Reforço

O programa computacional MeDiNa apresenta um modo, denominado Reforço, criado especificamente para dimensionar camadas de reforço. Para Nobrega (2013), no MeDiNa, o dimensionamento da camada de reforço de pavimentos leva em consideração as características elásticas dos materiais que compõem as camadas do pavimento, com o auxílio de softwares que aplicam a teoria da elasticidade a sistemas multicamadas.

Conforme Machado (2019), o acesso à aba Reforço pode ser realizado de duas formas: a partir de dados inseridos pelo próprio projetista, na opção Dados Novos; ou a partir da

importação de um arquivo de bacia deflectométrica do BackMeDiNa, pela opção Importar Retroanálise. Para cálculo do reforço é necessária a entrada dos valores de módulos retroanalisados de bacias de campo obtidas com FWD, obtidos na rotina BackMeDiNa; sendo que o programa MeDiNa lê o arquivo do BackMeDiNa, de extensão *.bac.

Conforme Franco (2018), com a finalidade de apresentar resultados mais confiáveis e precisos, a importação ou inserção de dados deve se referir a um segmento homogêneo, ou seja, um segmento com a mesma quantidade de camadas, mesmo tipo de condição de aderência entre elas, e a menor variação possível de módulos, deflexões e espessuras.

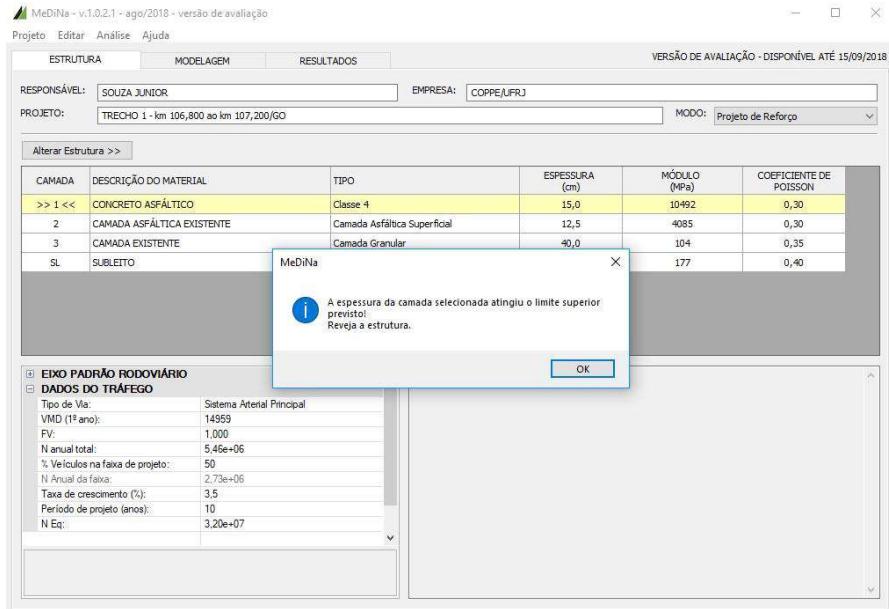
Para Machado (2019), durante o processo de importação, o programa calcula a média, o desvio padrão e os valores mínimos e máximos dos módulos equivalentes retroanalisados, assim como o valor da deflexão característica do trecho, que aparecem na janela Propriedades dos Materiais. Ainda, devem ser fornecidos os dados complementares da camada asfáltica existente, como o percentual de área trincada, IRI e idade do pavimento, para permitir o programa rodar as análises ou o dimensionamento. Com base nestes valores, o programa emite avisos para que o projetista tome decisões para o projeto final.

O MeDiNa não tem elementos nem modelos para avaliar a reflexão de trincas do pavimento antigo no novo. Caso o grau de trincamento atual seja muito elevado, cabe ao projetista elaborar estratégias e soluções para evitar ou adiar o processo de reflexão de trincas, independente do resultado do programa (SOUZA JUNIOR, 2018).

Franco (2018) acrescenta que no Modo Reforço, apenas a camada asfáltica nova poderá ser dimensionada. Nesta opção o programa realizará diversas análises, alterando a espessura da camada marcada, de forma a atender primeiramente o critério da fadiga. Nesse estágio o software aumentará ou diminuirá as espessuras, determinando a melhor espessura para atender o critério máximo permitido de área trincada. Admite-se espessura máxima de 15 cm, e caso não satisfaça, o projetista deve rever os dados e a estrutura, verificando se não é necessário adotar outra estratégia de restauração, como por exemplo, a fresagem.

O programa tem uma seção de alertas que auxiliam o projetista no dimensionamento, por exemplo: o programa alerta quando a espessura de uma camada de revestimento atingiu o máximo de 15 cm, conforme ilustra a Figura 25.

Figura 25 - Exemplo de alerta mostrado pelo software MeDiNa



Fonte: Souza Junior (2018)

2.4.11. DNER – PRO 269/94

Em junho de 1982, foi proposto por Preussler e Pinto um procedimento para projeto de reforço de pavimento flexível que permitia considerar explicitamente as propriedades resilientes de solos e materiais que, rotineiramente, constituem as estruturas de pavimentos no Brasil.

O procedimento DNER PRO-269/94 é uma norma que visa estabelecer as diretrizes e procedimentos a serem adotados na aplicação do método de projeto de restauração de pavimentos flexíveis, desenvolvido pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto S. Preussler, intitulado Método da Resiliência – TECNAPAV.

De acordo com Pinto (2016), os levantamentos necessários para aplicar o método DNER-PRO 269/94 são:

- Demarcação do trecho: feito a cada 20 metros.
- Determinação das deflexões recuperáveis: obtida em ambas as faixas com a viga Benkelman.
- Levantamento da condição do pavimento: deve incluir a determinação das áreas que apresentam trincas, buracos e remendos, de conformidade com o exposto na especificação DNER-ES 128/83. A avaliação do estado da condição da superfície pode ser complementada

através de medidas de irregularidade em ambas as faixas de tráfego, por meio de aparelhos medidores do tipo resposta, tais como Integrador IPR/USP ou Maysmeter. Nas superfícies de avaliação que apresentarem trincas de classe 2 e/ou 3, deve ser calculado o trincamento através da Equação 11.

$$TR = \frac{TRI}{S} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

TR = trincamento, em %;

TRI = é o total das áreas com trincamento de classe 2 e 3, bem como eventuais buracos e remendos contidos na superfície de avaliação, em m^2 ;

S = a área da superfície de avaliação, em m^2 .

- d) Sondagem a pá e picareta: poços posicionados alternadamente a cada 2 km, ou de forma que cada segmento homogêneo contenha um poço de sondagem.
- e) Caracterização do tráfego: contagem volumétrica, com no mínimo 3 dias, em um período de 24 hs diárias para contagem e 8 hs diárias para pesagem.

Segundo Pinto e Preussler (2010), os solos finos coesivos encontrados no subleito ou no seu reforço por sondagens, são listados abaixo e, seguido da Tabela 12, que determina a sua classificação de acordo com a porcentagem de silte em sua composição.

- a) Solos Tipo I – Solos com baixo grau de resiliência.
- b) Solos Tipo II – Solos com grau de resiliência intermediário.
- c) Solos Tipo III – Solos com grau de resiliência elevado.

Tabela 12 - Classificação dos solos finos quanto à resiliência

CBR %	Silte %		
	≤ 35	35 a 45	> 45
≥ 10	I	II	III

6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

Fonte: Pinto e Preussler (2010), adaptado pelo Autor

Para o dimensionamento do reforço, o DNIT (2006) diz que é necessário separar o trecho em segmentos homogêneos, definindo o seu revestimento existente (he), a deflexão característica (Dc), o trincamento (TR) e a espessura da camada granular (Hcg) e o tipo de solo da fundação.

O cálculo da espessura necessária de reforço do pavimento existente deve ser realizado de acordo com as etapas descritas a seguir:

1) A deflexão característica de projeto é obtida através da Equação 12:

$$Dc = D + \sigma \quad (12)$$

Onde:

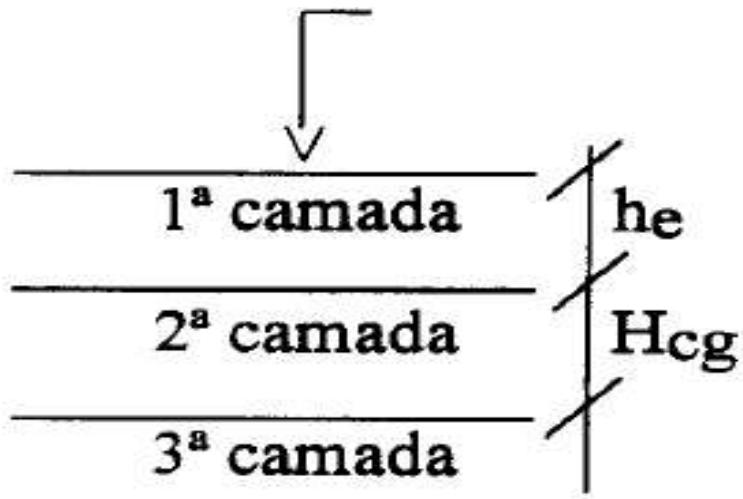
Dc : é a deflexão de projeto, em 0,01 mm;

D : é a média aritmética das deflexões de campo, e

σ : é o desvio padrão, em 0,01 mm

2) Para o trecho homogêneo analisado, deve-se definir uma estrutura de referência constituída por três camadas, conforme ilustrado na Figura 26, onde a primeira camada representa o material betuminoso, a segunda camada o material granular, e a terceira camada representa o solo.

Figura 26 - Estrutura de referência



Fonte: Pinto e Preussler, 2010

3) O solo da terceira camada deve ser classificado de acordo com a Tabela 12 em Tipo I, II ou III.

4) O valor da espessura efetiva é obtido através da Equação 13:

$$hef = -5,737 + (807,961 / Dc) + 0,972 * I1 + 4,101 * I2 \quad (13)$$

Onde:

hef: espessura efetiva em centímetros;

*I*1, *I*2: constantes relacionadas às características resilientes da terceira camada da estrutura de referência.

Os valores usuais de *I*1 e *I*2 são exibidos na Tabela 13. Caso o valor da espessura efetiva (*hef*) obtida pela Equação 9 seja um valor negativo, deverá ser adotado um valor igual a zero para *hef*, e se a espessura efetiva calculada for superior à espessura da camada betuminosa existente (*he*), o valor de *hef* adotado será igual a *he*.

Tabela 13 - Valores de *I*1 e *I*2

Espessura da camada granular (Hcg)	Classificação da 3ª camada	I1	I2
	Tipo I	0	0

≤ 45	Tipo II	1	0
		0	1
≥ 45	Tipo I	0	1
	Tipo II	0	1
		0	1

Fonte: Pinto e Preussler (2010), adaptado pelo Autor

5) A deflexão máxima admissível para a camada de reforço deverá ser obtida com base no critério de fadiga, por meio da Equação 14:

$$\log D = 3,148 - 0,188 * \log N_p \quad (14)$$

Onde:

D : é a deflexão máxima admissível, em 0,01 mm

Np: é o número cumulativo de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão para o período de projeto

6) O cálculo da espessura de reforço em concreto asfáltico (HR) será obtido pela Equação 15

$$HR = -19,015 + (238,14/\sqrt{D}) - 1,357 * hef + 1,016 * I1 + 3,893 * I2 \quad (15)$$

2.4.12. Estudos comparativos de dimensionamento de camadas de reforço

Machado (2019), em seu trabalho de pesquisa, utilizou o novo programa de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil (MeDiNa) para o cálculo de reforço do pavimento do anel viário da Universidade Federal de Juiz de Fora, visando o restabelecimento de propriedades funcionais. Segundo o autor, sua construção data da década de 1960 e, desde então, apenas uma restauração foi realizada – no ano de 1991, com a aplicação de um recapeamento com aproximadamente 4,0 cm de espessura sobre 2.140 metros de extensão.

O pavimento foi avaliado funcionalmente através de Levantamento Visual Contínuo Informatizado (LVCi) e ensaio de irregularidade longitudinal com perfilômetro a laser, e estruturalmente por meio de levantamento de deflexões realizado por equipamento FWD, além de abertura de poços de sondagem. Com relação ao tráfego, o volume médio diário (VMD) do campus, em dias úteis, corresponde a aproximadamente 9.000 veículos, considerando 90%

carros de passeio e 10% ônibus urbano, visto que caminhões são proibidos de trafegar no campus. Com os dados coletados na avaliação estrutural foi realizada uma retroanálise dos dados para obtenção dos parâmetros necessários para o cálculo da restauração, de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14 - Valores dos módulos obtidos na retroanálise

Segmento	Revestimento	Base	Sub-Base	Reforço	Subleito
1	6023	343	341	399	302
2	4910	252	304	368	297
3	7099	480	466	478	368
4	4733	261	220	225	2022
5	5174	364	426	509	335
6	4523	240	202	279	270
7	591	324	427	369	247
8	4898	241	243	258	183

Fonte: Machado (2019), adaptado pelo Autor

Após o devido dimensionamento chegou-se a conclusão de que a melhor solução de reforço foi o recapeamento de toda sua extensão com a mistura asfáltica de projeto em espessura única de 5,0 cm, observando a aplicação de uma camada antirreflexão de trincas em alguns trechos, segundo as Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Resultados obtidos no dimensionamento do reforço de todos os segmentos homogêneos

Segmento	Espessura de reforço (cm)	AT% no fim do período de projeto
1	5,0	18,8 %
2	5,0	24,2 %
3	5,0	14,1 %
4	9,4	29,2 %
5	5,0	18,8 %
6	9,4	28,4 %
7	5,0	19,6 %

8	8,8	29,5 %
---	-----	--------

Fonte: Machado (2019), adaptado pelo Autor

Tabela 16 - Resultados do dimensionamento dos segmentos 02, 04, 06 e 08 com camada antirreflexão de trincas

Segmento	Espessura de reforço (cm)	AT% no fim do período de projeto
2	5,0	15,6 %
4	5,0	19,0 %
6	5,0	19,0 %
8	5,0	18,2 %

Fonte: Machado (2019), adaptado pelo Autor

Franco *et al.* (2019) mostraram exemplos de projetos de reforço utilizando o MeDiNa. Foram analisados quatro segmentos de uma rodovia federal, de médio a alto volume de tráfego, onde foram coletados os materiais das camadas do pavimento, incluindo extração de corpos de prova da camada de rolamento para realização de ensaios laboratoriais, como por exemplo, o módulo de resiliência. Também foram realizados o levantamento visual de defeitos e a deflectometria com Falling Weight Deflectometer (FWD). Foram três etapas principais visando embasar o projeto do reforço, na seguinte ordem: campo, laboratório e cálculo, conforme Tabela 17.

Tabela 17 - Etapas do estudo

Etapa de campo	Etapa de laboratório	Etapa de cálculo
Levantamento de defeitos	Módulo de resiliência	Retroanálise – BackMeDiNa
Levantamento deflectométrico	Compressão diametral	Análise estrutural - MeDiNa
Extração de corpo de prova	Compactação	
Poços de sondagem	Módulo de resiliência triaxial	

Fonte: Franco *et. al* (2019), adaptado pelo Autor

Os autores consideram que o segmento de rodovia a ser analisado precisa ser homogêneo, com a mesma quantidade de camadas, o mesmo tipo de condição de aderência entre ca-

madas, e a menor variação possível de módulos, deflexões e espessuras. Na Tabela 18 estão listados os quatro segmentos analisados no estudo.

Tabela 18 - Perfil estrutural dos segmentos avaliados neste estudo: (a) segmento 1, (b) segmento 2, (c) segmento 3, e (d) segmento 4

(a)	(b)	(c)	(d)
Rev. asfáltico 10 cm		Rev. asfáltico 12 cm	
Brita graduada simples 13 cm	Rev. asfáltico 14 cm	Brita graduada simples 22 cm	
Brita graduada simples 18 cm	Brita graduada simples 10 cm	Brita graduada simples 13 cm	Rev. asfáltico 19 cm
Solo – 16 cm	Brita graduada simples 6 cm	Solo – 20 cm	Solo – 33 cm
Subleito	Subleito	Subleito	Subleito

Fonte: Franco *et. al* (2019), adaptado pelo Autor

A Tabela 19 apresenta a deflexão máxima, IRI e a % de área trincada de cada segmento homogêneo do estudo realizado.

Tabela 19 - Dados do levantamento de campo: deflectometria, irregularidade (IRI) e área trincada

Segmento	1	2	3	4
Deflexão máxima média (μm)	601	482	462	209
IRI (m/km)	3,5	3,0	4,5	4,0
% área trincada	20	20	25	15

Fonte: Franco *et. al* (2019), adaptado pelo Autor

Visando comparar os resultados obtidos utilizando os métodos tradicionais com os reforços calculados com o novo método MeDiNa (Tabela 21), apresenta-se na Tabela 20 as espessuras encontradas quando se aplicaram as condições de análise dos métodos PRO 11 e PRO 269.

Tabela 20 - Resultados do projeto de reforço pelos procedimentos PRO 11 e PRO 269

Segmento	Dfwd (média + DP) ($\times 10^{-2}$ mm)	DVB ($\times 10^{-2}$ mm)	D admVB PRO 11	D adm VB PRO 269	Reforço PRO 11 (cm)	Reforço PRO 269 (cm)
1	70	92	50	64	4	< 3
2	68	90	63	72	3	< 3
3	56	71	50	64	3	< 3
4	26	34	48	58	D < D adm	D < D adm

Fonte: Franco *et. al* (2019), adaptado pelo Autor

Tabela 21 - Resultados do projeto de reforço pelo MeDiNa

Segmento	1	2	3	4
Área trincada estimada no fim do período (%)	28,3	29,8	28,5	30,0
Espessura do revestimento fresado (cm)	10,0	5,0	12,0	5,5
Espessura da nova camada de revestimento no reforço (cm)	13,0	5,0	12,0	5,5
Tipo de mistura asfáltica no reforço	Classe 4	Classe 2	Classe 4	Classe 4
Reconstrução da camada de base	Sim	Não	Sim	Não
Módulo estimado da base reconstruída (Mpa)	500	-	380	-
Espessura da camada de base reconstruída (cm)	10	-	22	-

Fonte: Franco *et. al* (2019), adaptado pelo Autor

Segundo os autores, o uso de método mecanístico-empírico permite aproveitar melhor os materiais disponíveis para a pavimentação, reduzir custos para implantação ou restauração de pavimentos, além de projetar o reforço com diagnóstico da condição estrutural das várias camadas ao se utilizar a bacia de deflexão para determinação dos módulos por retroanálise. Ainda, concluem que os métodos de dimensionamento atuais do DNIT, em geral levam ao subdimensionamento da camada de reforço.

Nery (2020), em sua dissertação de mestrado, fez análises comparativas entre espessuras de reforço dos pavimentos calculadas segundo o Método PRO 011/79 e também pelo Método MeDiNa.

Segundo a autora, foram analisados seis segmentos de uma rodovia estadual, que faz a ligação de Joinville à Araquari, em Santa Catarina, pavimentada entre os anos de 2014 e 2019. Para os segmentos 01, 02 e 05, o revestimento asfáltico se encontrava com a idade de 5 anos durante os trabalhos de campo para medição das deflexões com os equipamentos LWD, FWD e viga Benkelman. Pavimentados em 2019, os segmentos 03, 04 e 06 foram avaliados após seis meses (com o FWD e o LWD) e após doze meses (com a viga Benkelman).

Conforme a autora, como a espessura de 14,2 cm foi calculada para a deflexão de projeto estimada em 131,90 (0,01 mm), considerada alta para o pavimento em questão (segmento 06 e aferida pela viga Benkelman), presume-se que 14,2 cm seja o maior valor possível de espessura de reforço para um futuro projeto de restauração segundo o PRO 011/79.

A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos a partir do Método MeDiNa para cada segmento do estudo e para cada classe de mistura asfáltica, da classe 1 até a classe 4. São verificadas soluções específicas em acordo com a particularidade de cada segmento e os materiais constituintes das camadas, fato não verificado no dimensionamento pelo PRO 011/79.

Segundo a autora, de modo geral, as espessuras encontradas variaram entre 5 e 15 cm, podendo ser superior a 15 cm quando se emprega mistura asfáltica com menor resistência à fadiga, caso da classe 1.

Tabela 22 - Previsão da espessura de reforço segundo o Método MeDiNa

Segmento (FWD)	Espessura de reforço (cm)			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
1	15,0	11,3	7,5	5,0
2	14,7	11,3	7,5	5,0
3	>15,0	15,0	13,2	10,7
4	>15,0	13,8	11,7	8,8
5	14,4	10,7	7,5	5,0

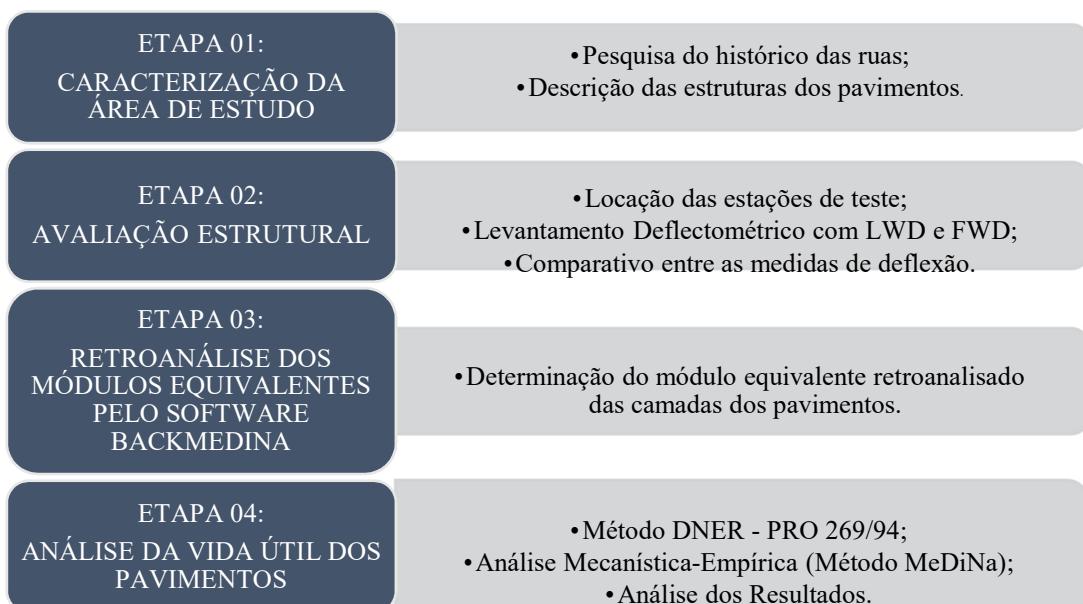
6	>15,0	12,9	10,7	7,5
---	-------	------	------	-----

Fonte: Nery (2020), adaptado pelo Autor

3. DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

Este capítulo apresenta a metodologia do estudo e as estruturas dos pavimentos analisados para alcançar os objetivos propostos. O presente trabalho contempla os levantamentos deflectométricos em campo de quatro ruas de Joinville com os equipamentos LWD e FWD com o objetivo de avaliar da vida útil do pavimento através dos Métodos MeDiNa e DNER PRO 269-94. A Figura 27 mostra o fluxograma do trabalho.

Figura 27 - Fluxograma – Etapas da pesquisa



Fonte: O autor

3.1. ETAPA 01 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1. Joinville – Dados geográficos

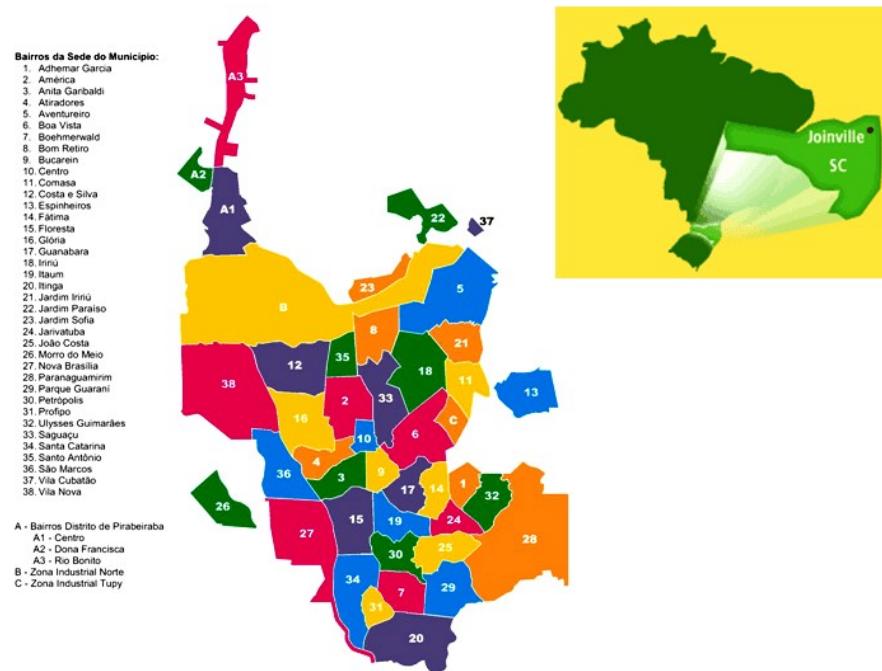
A cidade de Joinville está localizada no Estado de Santa Catarina, na região Sul do país. Situa-se no litoral norte do estado e confronta-se a leste com a Baía da Babitonga e a oeste com trecho da cadeia de montanhas da Serra do Mar.

Hoje, Joinville é a maior cidade catarinense e também o terceiro maior polo industrial do sul do Brasil, em uma região que produz 13,60% do Produto Interno Bruto (PIB) global do Estado. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), a cidade de Joinville possui uma área de 1.124,12 km², deste total, apenas 18,76% correspondem às áreas urbanas.

A população, de acordo com a última contagem do IBGE (2018), é de 583.144 habitantes - deste total, 96,61% reside na área urbana e 3,39% na zona rural, segundo informações contidas no relatório anual denominado *Joinville, Cidade em Dados*, elaborado pela Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento (SEPUD, 2019).

Para fins de administração do território, Joinville é dividida em dois distritos: i) Sede e ii) Pirabeiraba, e em 43 bairros, conforme a Figura 28. Os distritos Sede e Pirabeiraba abrangem áreas rurais e bairros; estes últimos são exclusivamente áreas urbanas.

Figura 28 - Mapa de localização e bairros do município de Joinville



Fonte: Sepud (2019)

3.1.2. Composição dos pavimentos asfálticos de Joinville

O sistema viário de Joinville é composto por aproximadamente 1.830 km de ruas, sendo que deste total, em torno de 670 km (35,40%), não apresentam sequer algum tipo de revestimento. Quanto à composição dos revestimentos existentes, há diversos tipos de estruturas presentes: lajotas de concreto, pedras de paralelepípedos, e diversos tipos de revestimentos asfálticos, tais como: tratamentos superficiais simples (TSS), tratamentos superficiais duplos (TSD), pré-misturados a frio (PMF), pré-misturados a quente (PMQ), além do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

Conforme o último levantamento realizado pela Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento, realizado em dezembro de 2017, e considerando somente vias com revestimento asfáltico, a extensão total pavimentada é de 920 km, o que representa 50% do total da malha viária existente. Ruas em lajotas (180,80 km) e revestidas de paralelepípedos (62,70 km) completam este cenário.

De acordo com as informações obtidas na Unidade de Pavimentação da Secretaria de Infraestrutura Urbana, as camadas das bases dos pavimentos urbanos da cidade de Joinville são em sua maioria de natureza granular, sendo constituídas de seixo bruto de rio, bica-corrida e brita-graduada. Já as camadas de sub-bases foram construídas principalmente com macadame seco. Vale salientar também que há extensões significativas de ruas de paralelepípedos que foram revestidas com camadas de concretos asfálticos.

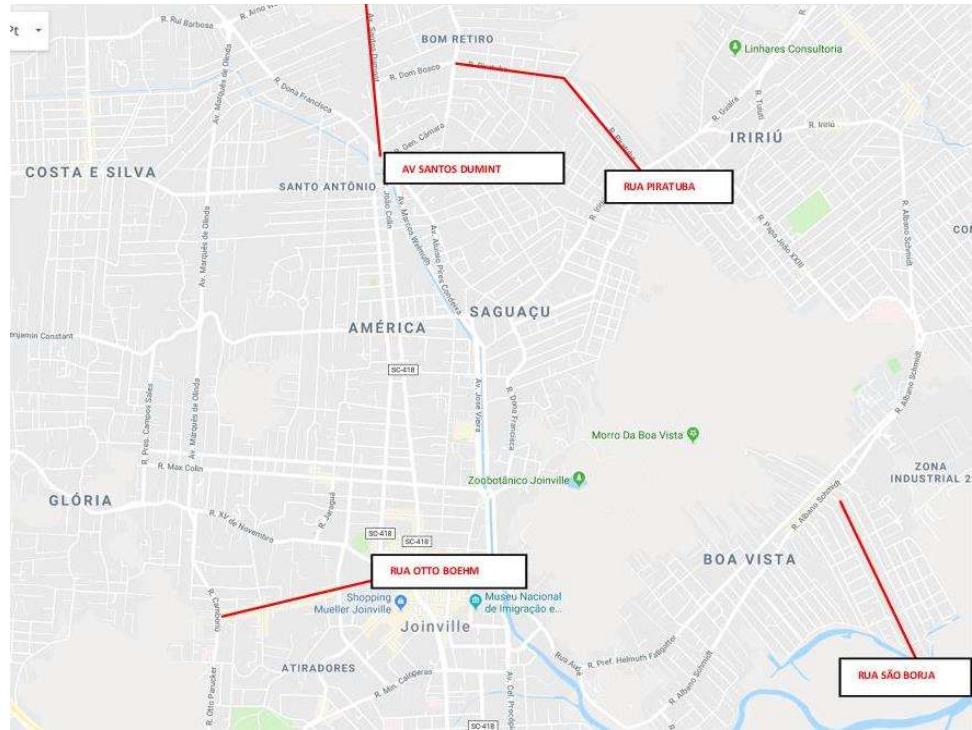
3.1.3. Caracterização dos objetos de pesquisa

As quatro vias que serviram de base para esta pesquisa ficam em bairros distintos do município. São elas as Ruas Otto Bohem, São Borja, Piratuba e Santos Dumont.

Com relação ao tráfego, duas delas são coletoras (Ruas Otto Bohem e Piratuba), uma é principal (Av. Santos Dumont), pois liga o centro da cidade ao aeroporto de Joinville, que fica situado no bairro mais populoso da cidade, denominado Aventureiro e, a outra é uma via residencial, sem saída, localizada no bairro Boa Vista (Rua São Borja), próximo ao Complexo Industrial da Tupy.

A Figura 29 mostra a localização das quatro ruas no sistema viário local.

Figura 29 - Localização das ruas nos bairros de Joinville



Fonte: Google Maps (2019)

Através de algumas visitas realizadas ao longo do mês de janeiro de 2020 à sede da Secretaria de Infraestrutura Urbana, foi possível obter dados históricos das referidas ruas analisadas, tais como extensão, largura, bairro de localização, bem como o ano da última restauração realizada nas mesmas, conforme apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Numeração e caracterização das ruas estudadas

Logradouro	Última restauração	Extensão (m)	Largura (m)
Rua 01 – Rua Otto Boehm	2017	1.240,00	12,00
Rua 02 – Rua São Borja	2003	1.220,00	12,00
Rua 03 – Rua Piratuba	2017	1.730,00	16,00
Rua 04 – Av. Santos Dumont	2016	8.260,00	30,00

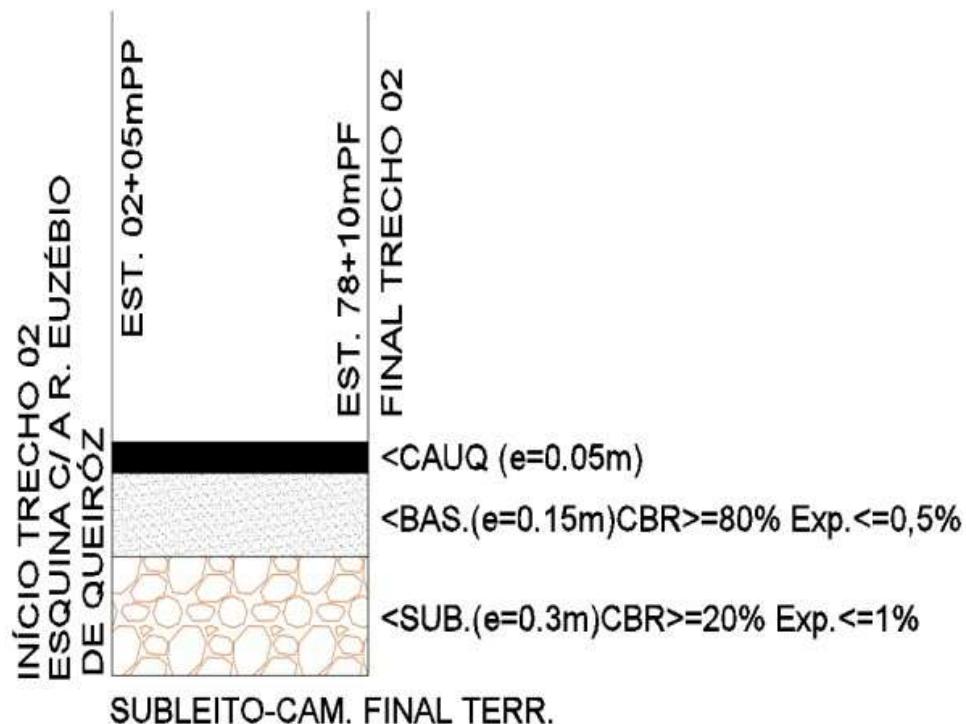
Fonte: O autor

Para a Rua 01 (Rua Otto Boehm), o trecho analisado fica entre as ruas Euzébio de Queiroz e Fernando de Noronha. A estrutura do pavimento neste local é constituída por camada de sub-base de pedra rachão de 30 cm, base de brita graduada de 15 cm e revestimento em camada única de CBUQ de 5 cm de espessura. O trecho possui edificações

construídas em toda a sua área de abrangência e semáforos, e é destinado ao trânsito que alimenta as vias principais.

O perfil típico desse pavimento é apresentado na Figura 30, e o mesmo teve de ser todo refeito no ano de 2017, após a implantação de uma galeria celular de concreto armado abaixo da camada de sub-base, em virtude das obras de requalificação do Rio Mathias (que é um dos principais rios que cortam a área urbana da cidade de Joinville).

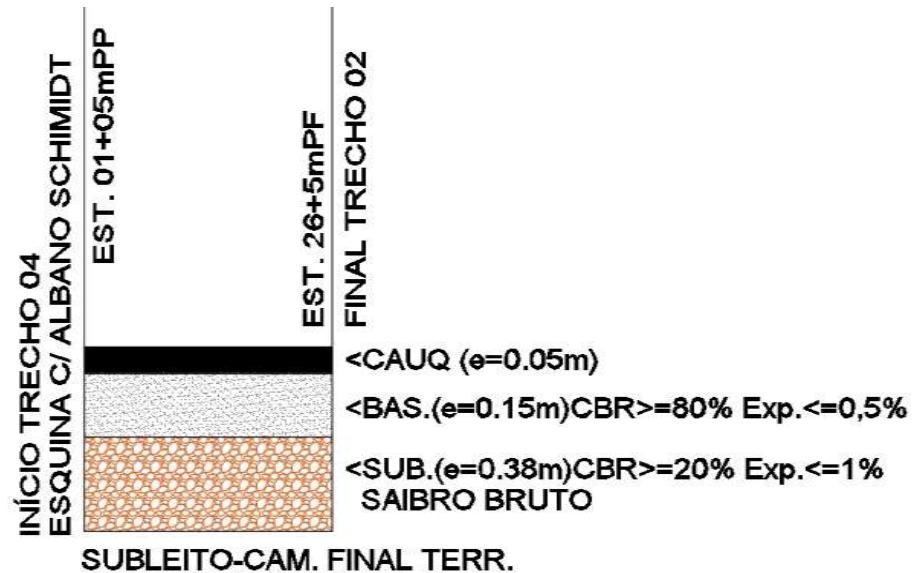
Figura 30 - Perfil da estrutura da Rua 01



Fonte: Rodrigues (2018)

Para a Rua 02 (Rua São Borja), o trecho analisado se inicia na Rua Albano Schmidt e vai até o seu final, tendo como limite uma região em mangue. É uma via que cumpre dar vazão ao trânsito local, não possui semáforos e as edificações ocupam a sua área de abrangência. O pavimento é constituído por camada de sub-base em saibro bruto de 38 cm de espessura, base em brita graduada de 15 cm e camada final de revestimento asfáltico de 5 cm. O perfil da Rua 02 é demonstrado na Figura 31. A última restauração realizada na Rua 02 ocorreu no ano de 2003.

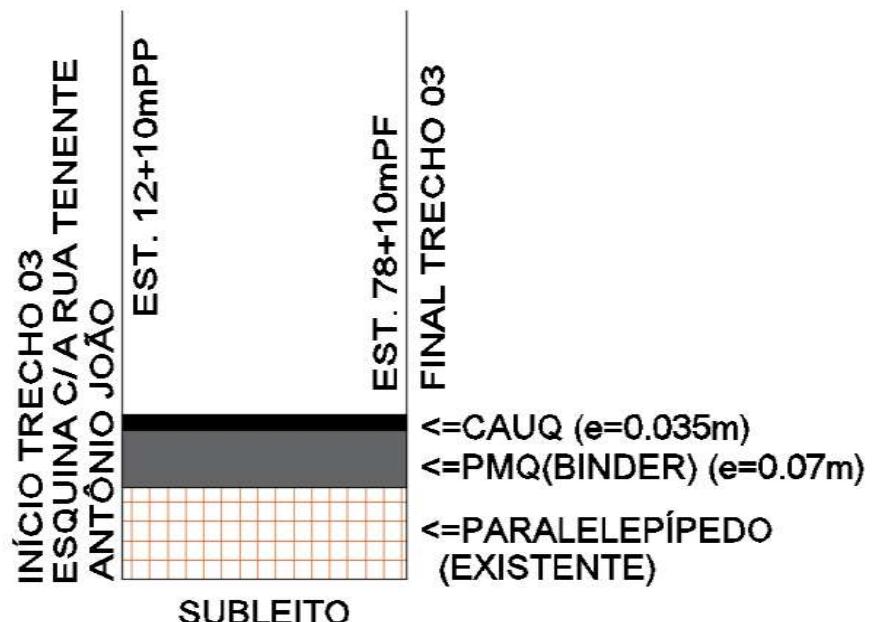
Figura 31 - Perfil da estrutura da Rua 02.



Fonte: Rodrigues (2018)

Para a Rua 03 (Rua Piratuba), o trecho analisado fica entre as ruas Tenente Antônio João e Iririú. Trata-se de pavimento originalmente construído em alvenaria de paralelepípedos (há mais de 20 anos) e que recebeu, no ano de 2017, uma camada asfáltica de regularização (*binder*) de 7 cm de espessura, e sobre esta, uma camada de rolamento de CBUQ de 3,50 cm, conforme apresentado na Figura 32.

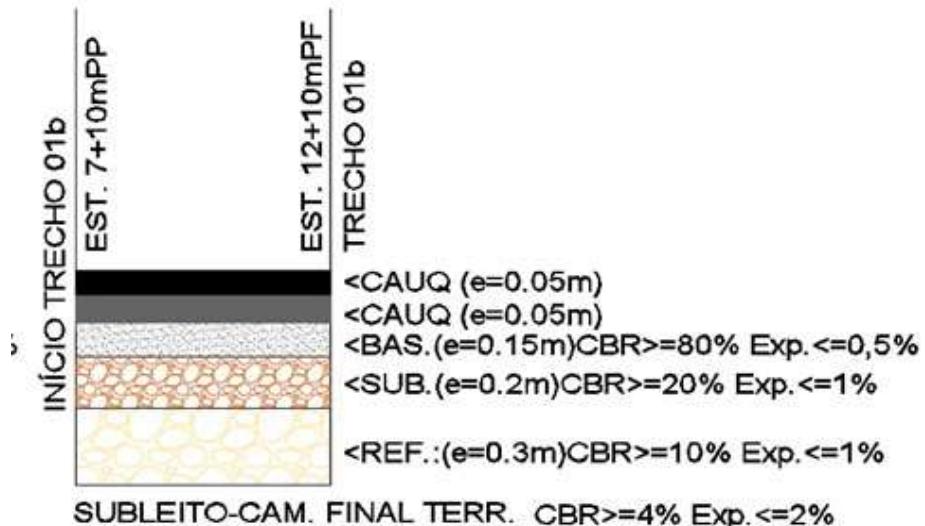
Figura 32 - Perfil da estrutura da Rua 03



Fonte: Rodrigues (2018)

Para a Rua 04 (Avenida Santos Dumont), o trecho analisado fica próximo à sede da empresa de transporte público coletivo, concluído no ano de 2017. A estrutura do pavimento neste local é constituída por uma camada de reforço de subleito em pedra rachão de 30 cm de espessura, camada de sub-base de 20 cm (também em pedra rachão), base de brita graduada de 15 cm e revestimento em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) executado em duas camadas, uma camada de ligação de 5 cm e uma camada de rolamento de 5 cm, perfazendo uma espessura total de 10 cm de material asfáltico, conforme apresenta a Figura 33.

Figura 33 - Perfil da estrutura da Rua 04



Fonte: Rodrigues (2018)

3.2. ETAPA 02 – AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

3.2.1. Locação das estações de teste

Os trechos escolhidos para o desenvolvimento da pesquisa foram os mesmos determinados por Rodrigues (2018) no tocante à análise do comportamento de cada uma delas quando investigadas por diferentes métodos de ensaios deflectométricos, de modo que este estudo proporcione novas perspectivas às avaliações estruturais em pavimentos urbanos com as mesmas características construtivas e de solicitações do tráfego de veículos.

Conforme Rodrigues (2018), que é engenheiro da Secretaria de Infraestrutura Urbana da Prefeitura de Joinville, a escolha destas quatro ruas se deu pelo fato de que duas delas

(Piratuba e Otto Bohem) passavam por obras de melhorias em seus pavimentos e as outras duas (Avenida Santos Dumont e Rua São Borja) possuíam projetos atualizados concomitantemente à fase de elaboração de sua dissertação de mestrado.

À época, a Avenida Santos Dumont também passava por obras, que resultaram na duplicação de parte de seu traçado e que foram realizadas com recursos do Governo Estadual e, fiscalizadas pelo Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina - DEINFRA/SC; e a Rua São Borja, situada no bairro Boa Vista, é parte constituinte do projeto de implantação da futura Ponte Joinville (que ligará os bairros Adhemar Garcia e Boa Vista), em fase de liberação ambiental.

Preliminarmente, e contando com auxílio de um topógrafo, as ruas foram vistoriadas no dia 29 de fevereiro de 2020 com intuito de reconhecer as áreas de estudo, analisar o estado de conservação dos pavimentos e procurar as demarcações topográficas remanescentes do estudo realizado no ano de 2017 por Rodrigues (2018). Em um segundo momento, no dia 07 de março do mesmo ano, foi realizado, por uma equipe de topografia, a demarcação e o georreferenciamento dos 40 pontos onde foram realizadas as medidas as deflexões – 10 pontos por rua, com 50 metros de distância entre os mesmos. A demarcação topográfica realizada em campo é ilustrada na Figura 34 e está listada no APÊNDICE A.

Figura 34 - Imagens da demarcação e georreferenciamento das estações de teste



Fonte: O autor

A locação em campo das estações de testes seguiu alinhamento recomendado pela norma DNIT 133/2010, que aponta sobre a conveniência de ensaiar as trilhas de roda, sendo

que para faixas de tráfego com 3,5m ou mais, o carregamento deverá ocorrer a 0,90m do bordo do meio-fio.

3.2.2. Levantamento deflectométrico

Nesta etapa foram medidas as deflexões com o equipamento LWD, e após dois meses, foi realizado o levantamento com o FWD.

3.2.2.1. Medição de deflexões com o LWD

O equipamento LWD utilizado nesta pesquisa foi do modelo HMP-LFG *pro* (procedência alemã) que possui indicação, segundo o fabricante, para leituras de deflexões em materiais que apresentem valor máximo do módulo de deformabilidade de 225 MPa. Para esse equipamento, o pulso de carga aplicada ao pavimento foi de 7,07 kN, produzido por uma massa de 10 kg que cai de uma altura de 720 mm. Esse impacto é distribuído na superfície por uma placa de aço com espessura de 2 cm e diâmetro de 30 cm. A acurácia absoluta da célula utilizada é de 1% da carga indicada.

Todo o procedimento deste ensaio foi realizado tendo em vista a norma E2835-11 da STANDARD, A.S.T.M. (2011) observando-se para cada estação de ensaio o seguinte procedimento:

- 1) Posicionou-se a placa no ponto de teste, garantindo uma superfície plana, e retirando possível material solto. Para este estudo foi conveniente o assentamento da placa do LWD com o auxílio de uma fina camada de areia, em virtude da declividade transversal da pista e a rugosidade do pavimento;
- 2) Assenta-se a placa para a esquerda e direita em 45°, de forma a posicioná-la no ponto de ensaio;
- 3) Realizaram-se seis quedas da massa, sendo que as três primeiras serviram de pré-compactação e as três últimas de medição.

O conjunto de medição é composto por maleta de comando (interligada por cabo a haste do aparelho), GPS e impressora (os dados podem ser impressos logo após a realização dos testes ou armazenados em computador). O LWD apresenta bolha de nível na haste para referência (inclinação), peso de queda, sistema de amortecimento e placa constituída por sensores de medição.

Na sequência segue imagem do levantamento realizado na Rua 1, conforme Figura 35.

Figura 35 - Medição com o LWD na Rua 1



Fonte: O autor

Os testes com o LWD foram executados no dia 21 de abril de 2020, entre o horário das 7:00 as 16:00 horas, com boas condições climáticas (as temperaturas do ar foram registradas simultaneamente à leitura da deflexão em cada ponto de avaliação e ficaram entre 22 °C e 28 °C) e com equipamento disponibilizado por empresa local (Geoforma Engenharia). As atividades foram realizadas por três pessoas: o autor, um topógrafo e um auxiliar, que ficou responsável pelos serviços de sinalização das vias durante o período dos testes. A investigação se deu em meia pista, para não interferir no trânsito local, e avaliaram-se o bordo-direito (a 90 cm do meio-fio) das quatro ruas.

As sequências dos ensaios foram executadas da seguinte forma:

- a) Espalhamento de uma camada de areia para garantir uniformidade na superfície do revestimento asfáltico;
- b) Assentamento da placa sobre a camada de areia;
- c) Nivelamento do equipamento;
- d) Conexão do equipamento à maleta de comando;
- e) Realização de três quedas do peso para pré-compactação da base;
- f) Realização de três quedas adicionais do peso para o registro das leituras de deflexão.

O referido procedimento foi repetido duas vezes em cada ponto de teste, a fim de obter duas leituras de deflexão e módulo de elasticidade, para posterior obtenção da média entre as leituras. A temperatura do pavimento não foi medida. As leituras de deflexão obtidas a partir destes ensaios estão listadas no Apêndice A.

No levantamento realizado na Rua 4, cinco pontos foram medidos na faixa exclusiva para circulação dos ônibus, e os outros cinco, na rua lateral à Avenida, entre a entrada da garagem dos ônibus da empresa Transtusa e a Rua Pastor Schlipper, conforme Figura 36.

Figura 36 - Imagens do levantamento com LWD na Rua 4



Fonte: O autor

3.2.2.2. Medição de deflexões com o FWD

O equipamento FWD utilizado para a realização dos testes foi disponibilizado de forma gratuita pela empresa paulista RoadRunner Engenharia – que realiza ensaios para a Concessionária Arteris, a qual administra o trecho norte da Rodovia BR 101- SC. Os ensaios foram realizados no período noturno, sendo este o único período colocado à disposição pela empresa.

O equipamento FWD utilizado neste estudo é de fabricação americana, marca/modelo Dynatest 8002, número de série 8002-956. O mesmo conta com 3 blocos de 25kg de cada lado, totalizando uma massa de queda de 150kg.

O equipamento é construído sobre um sistema de reboque (trailer). A deflexão recuperável, que é formada na superfície do pavimento (bacia de deflexões), é obtida devido a 7 geofones (transdutores de velocidade) instalados na placa de carga e distribuídos ao longo de uma barra metálica. As distâncias dos geofones ao centro da placa de carga são fixadas procurando-se posicioná-los de forma que os deslocamentos registrados reflitam o comportamento e deformabilidade das diversas camadas do pavimento e represente a geometria completa da bacia de deflexão. O ensaio dura cerca de um minuto e pode ser executado em todas as faixas de tráfego da rodovia e em qualquer espaçamento desejado entre os pontos de ensaios.

O levantamento deflectométrico com o equipamento FWD foi executado no dia 16 de junho de 2020, teve rápida duração (das 22:00 até as 23:30 horas) e realizado com tempo chuvoso (temperatura do ar de 24 °C). A temperatura do pavimento variou entre 24 °C e 25 °C.

O ensaio seguiu a Norma DNIT 132/2010-PRO e teve a participação de quatro pessoas: o autor desta pesquisa de mestrado, o técnico do equipamento (e motorista da caminhonete), além dos dois motoristas dos veículos de apoio para sinalização das ruas. A Figura 37 ilustra o momento de execução de uma medição com o FWD na Rua 4. A medição se deu em meia pista, para não interferir no trânsito local, e assim como no ensaio com o LWD, também se avaliaram o bordo-direito das respectivas ruas (a uma distância de 90 cm do meio-fio).

Figura 37 - Veículo de medição e carros de apoio para a sinalização no levantamento realizado na Rua 4



Fonte: O autor

A Figura 38 ilustra imagens do levantamento realizado nas quatro ruas avaliadas, na mesma sequência dos levantamentos realizados com o LWD, que são: Rua Otto Boehm (1), São Borja (2), Piratuba (3) e Av. Santos Dumont (4).

Figura 38 Imagens do levantamento com FWD



Fonte: O autor

3.2.3. Análise dos resultados dos levantamentos deflectométricos

Com os resultados das medidas de deflexão foram determinados os valores da média (X), desvio padrão (σ), valores máximos (D_{max}) e mínimos (D_{min}), deflexões características (DC) e coeficiente de variação (CV) de cada rua avaliada.

Todas as análises estatísticas do presente estudo foram realizadas através do *software* Excel. As medidas de deflexão foram interpretadas através de diagramas de caixa e diagramas lineares. Os diagramas de caixa permitiram a identificação dos pontos distantes da mediana da amostra, denominados *outliers*, os quais foram excluídos das análises estatísticas.

3.2.3.1. Análise de correlação e de regressão linear entre medidas de FWD *versus* LWD

Buscou-se correlacionar as medições de deflexões realizadas com os equipamentos FWD *versus* LWD. Para isso, foi determinado o coeficiente de correlação de Pearson (r) de modo a verificar se há linearidade entre as medidas de deflexão aferidas pelos equipamentos.

Conforme Montgomery e Runger (2018), correlações abaixo de 0,50 são consideradas fracas e correlações acima de 0,80 são consideradas fortes. Já valores de coeficiente de Pearson (r) entre 0,50 e 0,80 podem indicar correlação moderadamente forte e uma possível relação linear entre as variáveis.

Foi utilizada a análise de regressão linear simples para modelar empiricamente as medidas de deflexões entre o LWD e FWD e os ajustamentos dos modelos de regressões foram avaliados pelos coeficientes de determinação (R^2).

3.2.3.1. Comparação entre as medidas de deflexões aferidas por Rodrigues (2018) e por este estudo

As medições deflectométricas com o LWD foram comparadas com os resultados da pesquisa de Rodrigues (2018), nos mesmos pontos de ensaios e com o mesmo equipamento.

3.3. ETAPA 03 – RETROANÁLISE DOS MÓDULOS EQUIVALENTES PELO SOFTWARE BACKMEDINA

3.3.1. Determinação dos módulos de elasticidade das camadas dos pavimentos

Com as bacias de deflexão determinadas em campo foram realizadas as retroanálises de modo a se obter os módulos equivalentes para cada camada do pavimento das 4 ruas

objetos de estudo desta pesquisa de mestrado. A retroanálise foi realizada utilizando o software BackMeDiNa. As retroanálises foram realizadas conforme procedimento descrito no item 2.4.10.2.

O procedimento para a realização das retroanálises partiu da inserção dos dados das bacias de deflexão obtidas com o FWD em uma planilha do *software* Excel em formato “csv” (valores separados por vírgulas). O modelo da planilha preenchida é disponibilizado no *software* BackMeDiNa através da aba “projeto” e opção “modelo de arquivo de bacias”. A Tabela 24 apresenta o arquivo formato “csv” preenchido no Excel para os dados de FWD relacionados à Rua 01 do estudo.

Tabela 24 - Preenchimento da planilha em Excel da Rua 01 do arquivo de bacias para os dados do FWD.

BACKMEDINA																					
SEÇÃO:	Modelo																				
RAIO (cm):	15																				
Data de Execuçāo:	Temp. Do	Temp. Do	Carga	Estaca – N	Estaca – D	Estaca – F	Estaca – T	d0	d20	d30	d45	d60	d90	d120							
16/06/2020	24	24	4086	1	0	0	0	418	306	228	165	127	86	65							
16/06/2020	24	24	4093	2	0	0	0	364	257	195	152	109	79	59							
16/06/2020	24	24	4079	3	0	0	0	392	296	223	162	119	80	59							
16/06/2020	24	24	4107	4	0	0	0	216	131	92	62	50	45	36							
16/06/2020	24	24	4093	5	0	0	0	369	274	208	146	102	65	48							
16/06/2020	24	24	4086	6	0	0	0	282	210	165	121	85	57	45							
16/06/2020	24	24	4093	7	0	0	0	330	239	184	138	93	66	48							
16/06/2020	24	24	4093	8	0	0	0	284	201	155	114	78	55	42							
16/06/2020	24	24	4114	9	0	0	0	257	162	125	84	61	45	37							
16/06/2020	24	24	4121	10	0	0	0	194	127	85	60	45	39	37							

Fonte: O autor

Na sequência do processo, os dados preenchidos conforme a planilha da Tabela 16 foram importados para o BackMedina, a partir da sua aba ‘projeto’. Após isso, foram lançados os dados da estrutura do pavimento das ruas avaliadas. Foram adotados os valores do coeficiente de Poisson já informados pelo programa para cada tipo de material.

Conforme sugerido por Knabben (2020), os valores iniciais adotados para os módulos de elasticidade dos materiais constituintes das camadas dos pavimentos avaliados foram:

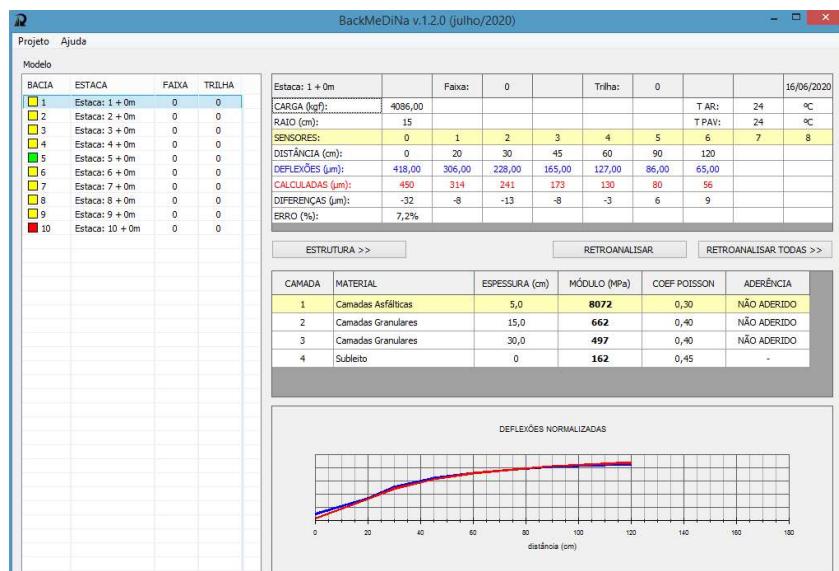
- Revestimento asfáltico = 6.500 MPa
- Camada de base (granular) = 350 MPa
- Camada de sub-base (granular) = 200 MPa
- Subleito = 100 MPa

Conforme Knabben e Carpio (2020), quanto à condição de aderência entre as camadas, é considerado como totalmente aderida a interface entre camadas asfálticas. Para as demais situações o Software Medina considera como não aderido.

Na Figura 39 pode-se visualizar a tela do BackMeDiNa e a representação das bacias deflectométricas obtidas com o FWD para a Rua 01. Ao encerrar cada etapa do processo de cálculo da retroanálise, o botão é acionado novamente até se obter uma melhor aproximação

entre as deflexões medidas e calculadas, com objetivo de se atingir o menor valor de erro possível (RMS em μm). Para erros menores que 5 μm a bacia é representada com a cor verde. Para valores de erros entre 5 e 10 μm a bacia é representada na cor amarela, e para valores acima de 10 μm são representadas na cor vermelha. Todas as retroanálises estão listadas nos APÊNDICES K, L, M e N.

Figura 39 - Representação do BackMeDiNa das bacias obtidas com o FWD para a Rua 01



Fonte: O autor

3.4. ETAPA 04 – ANÁLISE DA VIDA ÚTIL DOS PAVIMENTOS

A etapa final da pesquisa previu um comparativo entre o Método DNER PRO 269/94 e o Método MeDiNa para a análise da vida útil dos pavimentos. Foi calculada a espessura de reforço necessário para que o pavimento atingisse a vida útil determinada em projeto para o novo tráfego estimado para as duas metodologias.

3.4.1. Número N para o novo período de projeto

Os valores para o número N (de projeto) das Ruas 01 e 03 foram adotados conforme recomendação da empresa Azimute Engenharia, empresa fiscalizadora das obras executadas, conforme ANEXO A. No entanto, o número N (de projeto) das Ruas 02 e 04 foram obtidos através dos projetos existentes para as obras de melhorias na estrutura dos pavimentos das mesmas, fornecidos pela Prefeitura de Joinville (ANEXOS B e C). Os valores do número N adotados para cada uma das ruas estão listados na Tabela 25.

Tabela 25 - Número N das ruas avaliadas

Rua	Ano do projeto	Número N de projeto	Período de projeto
Rua 01	2017	5×10^6	10 anos
Rua 02	2016	$8,57 \times 10^6$	10 anos
Rua 03	2017	5×10^6	10 anos
Rua 04	2012	2×10^7	10 anos

Fonte: O autor

3.4.1.1. Método MeDiNa para o projeto de reforço

Com o emprego do *software* MeDiNa e da metodologia descrita no *Modo Reforço* (item 2.4.10.4) foram inseridos os parâmetros das camadas dos pavimentos: materiais, espessuras, coeficiente de Poisson e valores dos módulos retroanalisados com os dados do FWD, conforme orientação do método.

Foram efetuadas análises e definição de espessuras de reforço considerando-se a mistura asfáltica teórica da Classe 1, encontrada na base de dados do MeDiNa, realizando o comparativo entre resultados encontrados em função da resistência à fadiga da classe teórica.

A Classe 1 é a que mais se aproxima das misturas asfálticas aplicadas sob a supervisão da Prefeitura de Joinville/SC, em virtude do ligante asfáltico e dos agregados pétreos utilizados na mistura do concreto asfáltico.

3.4.1.2. Método DNER – PRO 269/94 para o projeto de reforço

O dimensionamento pelo método DNER PRO – 269/94 foi realizado conforme metodologia descrita no item 2.4.11.

No entanto, para aplicar este procedimento, há uma dificuldade adicional que é o fato da deflexão neste estudo ter sido obtida com os equipamentos LWD e FWD.

Conforme Franco *et al.* (2019), sabe-se que não há uma relação única entre as deflexões medidas por diferentes equipamentos, podendo existir correlações particulares para cada tipo de estrutura. Sendo assim, visando uma comparação relativa, foram usadas as expressões de Pinto (1991): $DVB = 1,32 \times D_{FWD}$ e Rodrigues (2018): $DVB = -0,55 \times D_{LWD} + 77,19$ para os valores das deflexões características aferidas pelos equipamentos utilizados na pesquisa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

4.1.1. Avaliação Geral das Ruas

A maior parte das ruas avaliadas foram restauradas entre os anos de 2016 a 2017, com exceção da Rua 2, que foi restaurada pela última vez no ano de 2003.

Não se verificou, através de inspeção visual, qualquer defeito no pavimento ocasionado pela repetição das cargas do tráfego nas Ruas 1 e 3.

No entanto, na Rua 2, foram identificados diversos remendos ao longo de toda extensão da rua, provenientes de consertos de vazamentos da rede de água local, além de trincas e do desgaste natural do pavimento existente, conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 40 - Defeitos existentes na Rua 2



Fonte: O autor

Por fim, na Rua 4, no trecho referente a faixa exclusiva do corredor do ônibus, foram identificadas várias trincas no revestimento geradas pela deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga, denominadas “couros de jacaré”, de acordo com a classificação do Anexo A da Norma DNIT 005/2003-TER, e evidenciado conforme a Figura 41.

Figura 41 - Defeitos existentes na Rua 4



Fonte: O autor

No que se refere às medidas de deflexão, no contexto geral, os pavimentos das ruas avaliadas apresentaram bom desempenho.

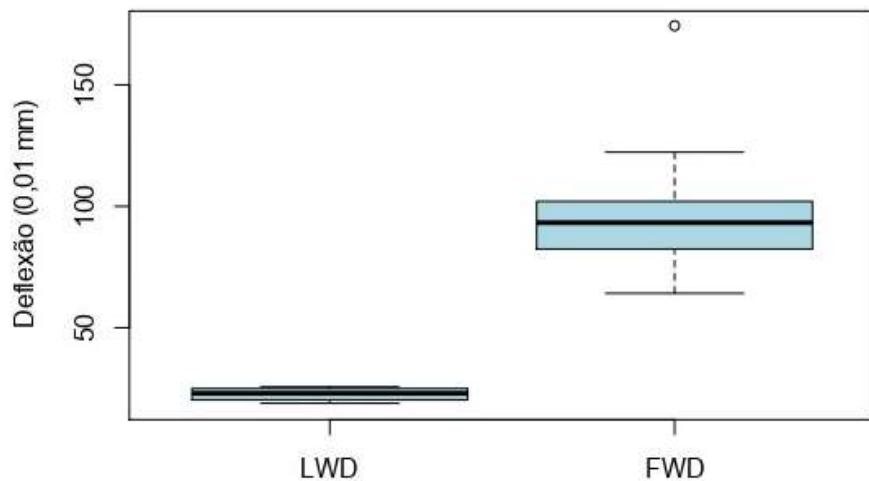
4.1.2. Levantamento Deflectométrico

A Tabela 26 apresenta os resultados dos levantamentos deflectométricos realizados com os equipamentos LWD e FWD para as quatro ruas avaliadas, respectivamente.

Foram identificados quatro pontos *outliers* para as medidas de deflexão realizadas com o FWD, sendo que dois foram obtidos na Rua 2 e a mesma quantidade na Rua 4.

Os pontos *outliers* da Rua 2 referem-se às medidas aferidas nas estacas 2 e 7, com deflexões de $173,80 \times 10^{-2}$ mm e $63,60 \times 10^{-2}$ mm, respectivamente. O ponto da estaca 2 ficou muito distante da máxima deflexão, que foi de $121,90 \times 10^{-2}$ mm, ao passo que o ponto da estaca 7 ficou muito distante da mínima deflexão, que foi de $78,80 \times 10^{-2}$ mm, conforme podem ser visualizados na Figura 42, e ambos foram excluídos das análises realizadas neste estudo com o FWD.

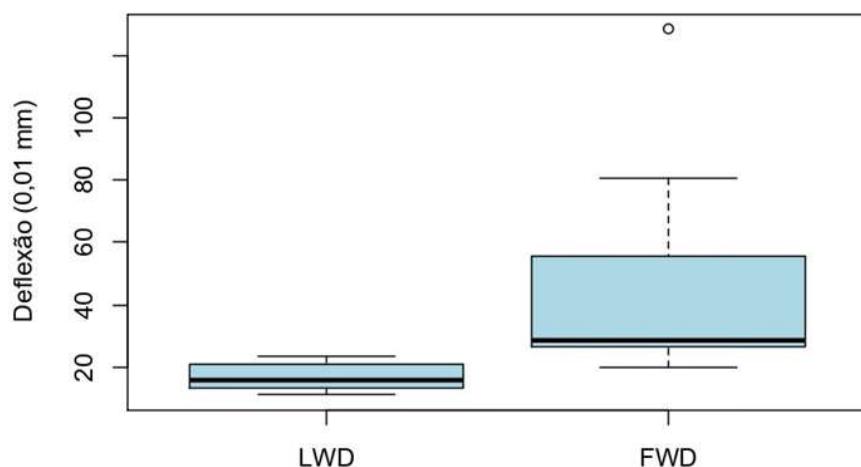
Figura 42 - Diagramas de caixa para as medidas de deflexão realizadas com o FWD e o LWD na Rua 2



Fonte: O autor

Já para a Rua 4, os pontos *outliers* referem-se às medidas aferidas nas estacas 1 e 3, com deflexões de $128,30 \times 10^{-2}$ mm e $80,80 \times 10^{-2}$ mm, respectivamente. Ambos os pontos das estacas 1 e 3 ficaram muito superiores a máxima deflexão encontrada, que foi de $55,80 \times 10^{-2}$ mm, de acordo com a Figura 43, e também foram excluídos das análises realizadas neste estudo com o FWD.

Figura 43 - Diagramas de caixa para as medidas de deflexão realizadas com o FWD e o LWD na Rua 4



Fonte: O autor

Tabela 26 - Resultados das deflexões obtidas com LWD e FWD

ponto	Rua 01		Rua 02		Rua 03		Rua 04		obs	
	Deflexão (0,01mm)		Deflexão (0,01mm)		Deflexão (0,01mm)		Deflexão (0,01mm)			
	LWD	FWD	LWD	FWD	LWD	FWD	LWD	FWD		
01	11,60	41,80	18,30	101,50	17,70	67,4	-	-	fx onibus	
02	14,80	36,40	-	-	16,20	52,2	13,85	55,80	fx onibus	
03	17,70	39,20	25,40	92,80	17,70	55,2	-	-	fx onibus	
04	11,50	21,60	22,55	98,30	17,00	56,6	20,70	29,50	fx onibus	
05	15,30	36,90	22,10	85,80	19,50	43,6	23,05	27,60	fx onibus	
06	15,35	28,20	24,80	78,80	21,85	41,4	17,60	19,80	marginal	
07	11,75	33,00	-	-	14,80	40,5	11,15	25,60	marginal	
08	12,20	28,40	20,20	92,70	16,30	42,0	13,35	26,50	marginal	
09	11,80	25,70	21,65	82,30	20,35	69,5	13,50	29,80	marginal	
10	13,65	19,40	19,10	121,90	14,95	40,4	13,05	27,20	marginal	
X	13,57	31,06	21,76	94,26	17,64	50,88	15,78	30,23		
σ	2,14	7,58	2,53	13,58	2,31	11,12	4,21	10,79		
DC	15,71	38,64	24,29	107,84	19,95	62,00	19,99	41,01		
D _{min}	11,50	19,40	18,30	78,80	14,80	40,40	11,15	19,80		
D _{max}	17,70	41,80	25,40	121,90	21,85	69,50	23,05	55,80		
CV%	16,00	24,00	12,00	14,00	13,00	22,00	27,00	36,00		
Tar (°C)	28,00	24,00	22,00	24,00	26,00	24,00	27,00	24,00		
N	11,00	10,00	9,00	10,00	11,00	10,00	9,0	10,0		
Data do ensaio	21/04/20	16/06/20	21/04/20	16/06/20	21/04/20	16/06/20	21/04/20	16/06/20		
Período do ensaio	diurno	noturno	diurno	noturno	diurno	noturno	diurno	noturno		

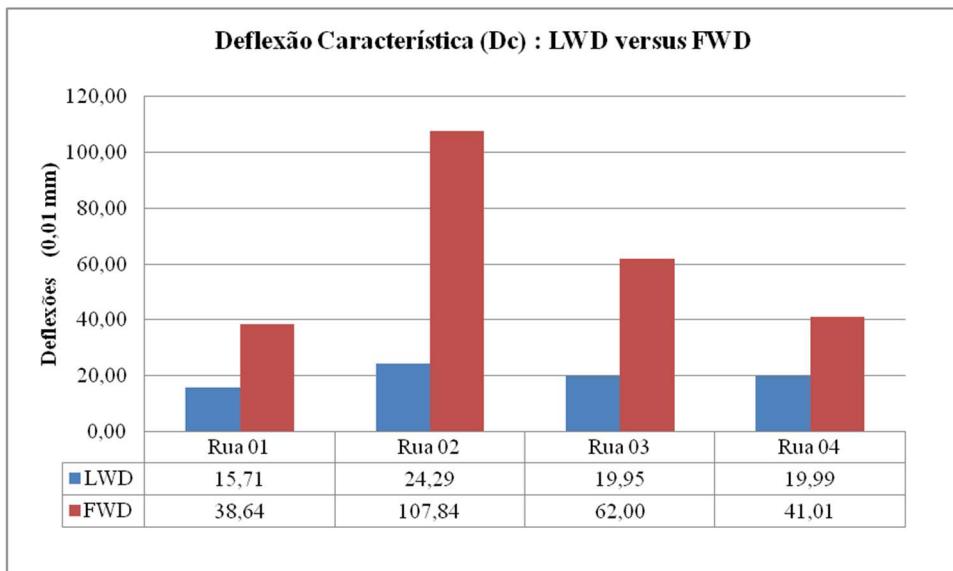
Fonte: O autor

Os resultados mostraram que os valores de deflexão medidos pelo LWD foram inferiores aos medidos pelo FWD para todas as ruas, com o intervalo de valores compreendidos entre o mínimo de $11,15 \times 10^{-2}$ mm e máximo de $25,40 \times 10^{-2}$ mm para o LWD; e entre o mínimo de $19,40 \times 10^{-2}$ mm e máximo de $121,90 \times 10^{-2}$ mm para o FWD.

As Ruas 2 e 3 foram as que apresentaram os valores mais elevados de deflexão para ambos os equipamentos. Isso pode ser explicado já que a Rua 2 ultrapassou a sua vida de projeto, cuja última restauração ocorreu no ano de 2003 e, na Rua 3, foi executado uma camada de reforço em concreto asfáltico em cima da camada de paralelepípedo existente sem nenhum projeto efetivo de restauração.

A Tabela 27 ilustra o comparativo das deflexões características obtidas pelo LWD e FWD para cada rua do estudo. Esses valores são utilizados nas equações dos cálculos de dimensionamento da espessura de reforço pelo Método DNER PRO 269/94.

Tabela 27 - Comparativo entre as medidas de deflexões médias: LWD versus FWD



Fonte: O autor

As medidas das deflexões aferidas com os dois equipamentos apresentaram coeficiente de variação (CV) abaixo de 30% para quase a totalidade dos trechos – com exceção da avaliação com o FWD da Rua 04, que apresentou valores acima de 30%. A norma IP-DE-P00/003 (DER-SP, 2006) especifica valores de coeficientes de variação próximos de 30% para determinar que uma amostra seja aceita como segmento homogêneo. Entretanto, por se tratar de ruas de pequena extensão ficou inviável a divisão do trecho em segmentos homogêneos.

Os valores para o coeficiente de variação ficaram compreendidos de forma crescente de: 12% (Rua 02), 13% (Rua 03), 16% (Rua 01) e 27% (Rua 04) para o ensaio LWD, e de: 14% (Rua 02), 22% (Rua 03), 24% (Rua 01), e 36% (Rua 04) para o ensaio com o FWD.

Os Gráficos 1 a 4 ilustram o comparativo entre as medidas deflectométricas de LWD versus FWD para cada rua. Os resultados mostram uma diferença significativa entre as duas medições, principalmente para a Rua 02.

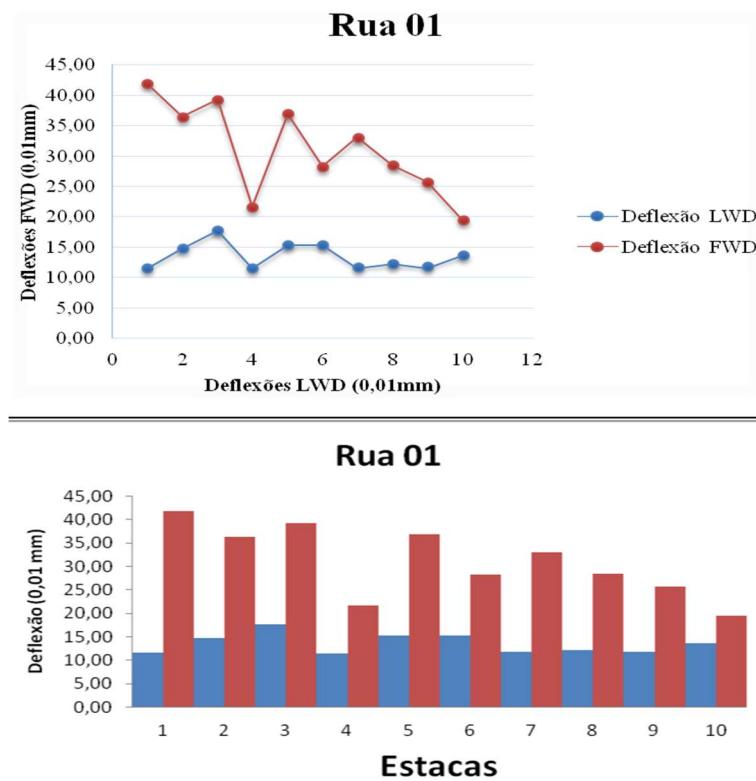
Verifica-se que em todos os pontos analisados, independentemente da estrutura do pavimento e sua idade de operação, as medidas com o LWD são sempre menores que as deflexões geradas pelo FWD. As deflexões produzidas pelo FWD são maiores que as obtidas pelo LWD, pois são as que mais se aproximam das geradas pelas cargas das rodas de um caminhão em movimento.

Em seu estudo, Rodrigues (2018) verificou valores de deflexão obtidas com o LWD superiores quando comparado à deflexão medida com a Viga Benkelman para as Ruas 1 e 4, e inferiores na comparação para as Ruas 2 e 3.

Segundo o autor, os valores de deflexão médias obtidos considerando os quatro trechos variaram de $13,75$ a $63,53 \times 10^{-2}$ mm, e de $27,81$ a $82,19 \times 10^{-2}$ mm, com o emprego da Viga Benkelman e com o LWD, respectivamente. As deflexões características obtidas pela Viga Benkelman variaram de $19,05 \times 10^{-2}$ mm a $77,08 \times 10^{-2}$ mm, enquanto que para o LWD variaram de $34,94$ mm a $101,27 \times 10^{-2}$ mm.

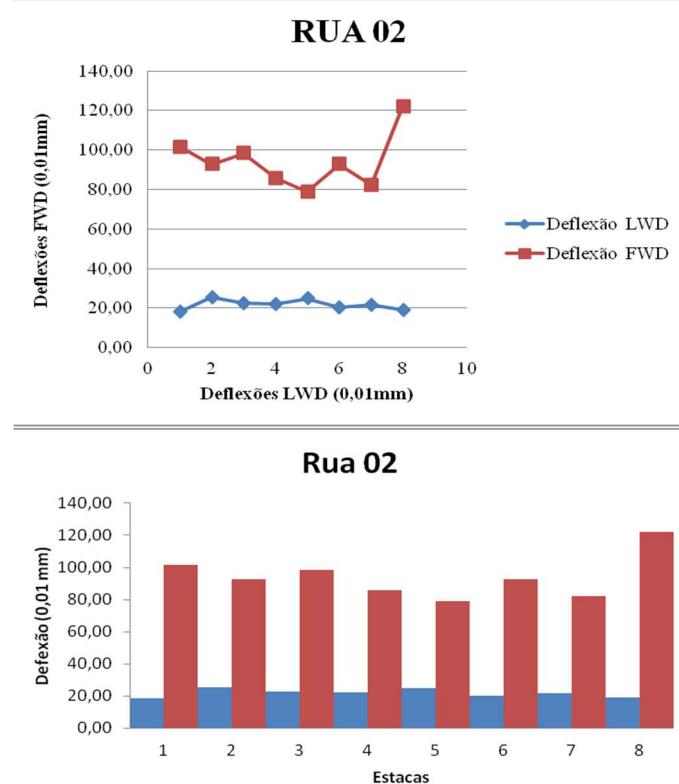
Na pesquisa de Nery (2020), os menores valores de deflexão foram obtidos com a viga Benkelman e no segmento 05, o qual possui reforço do subleito em areia e que foi pavimentado há 5 anos. Já as maiores deflexões foram verificadas para as leituras com o LWD e obtidas para o segmento 03, executado também com reforço em areia, mas com execução recente.

Gráficos 1 - Gráficos das medidas deflectométricas do LWD e FWD para a Rua 1



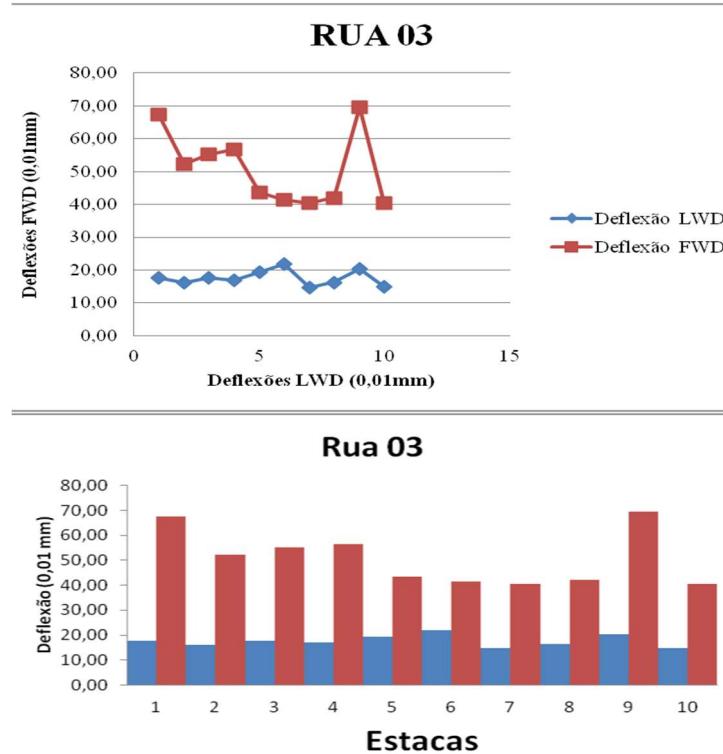
Fonte: O autor

Gráficos 2 - Gráficos das medidas deflectométricas do LWD e FWD para a Rua 2



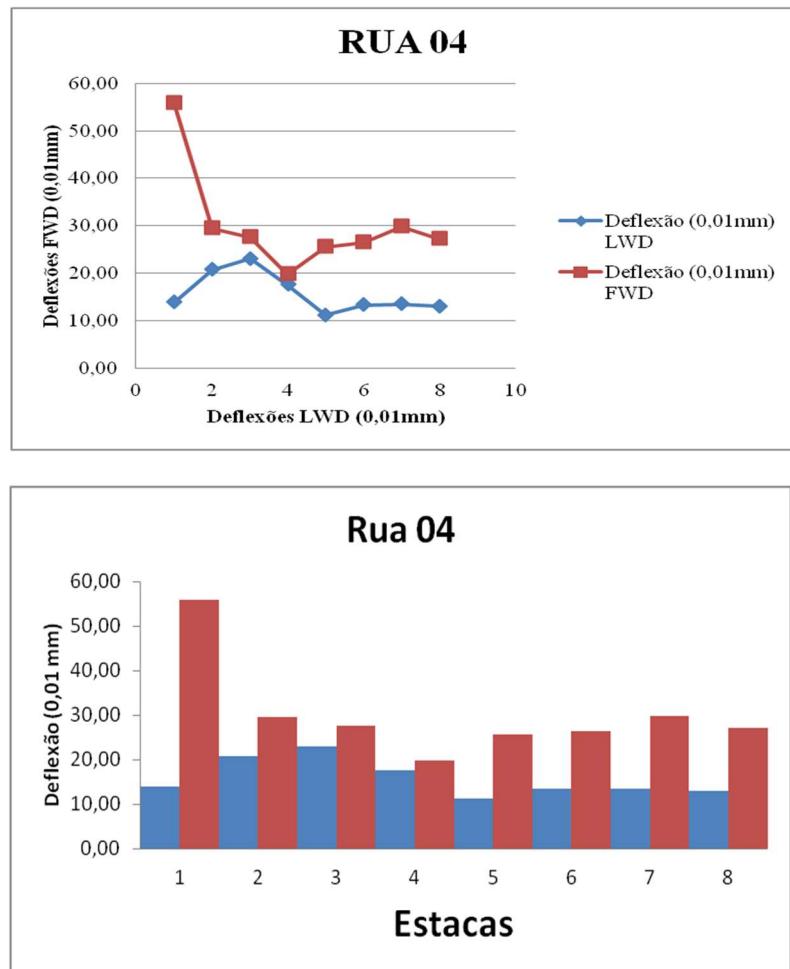
Fonte: O autor

Gráficos 3 - Gráficos das medidas deflectométricas do LWD e FWD para a Rua 3



Fonte: O autor

Gráficos 4 - Gráficos das medidas deflectométricas do LWD e FWD para a Rua 4



Fonte: O autor

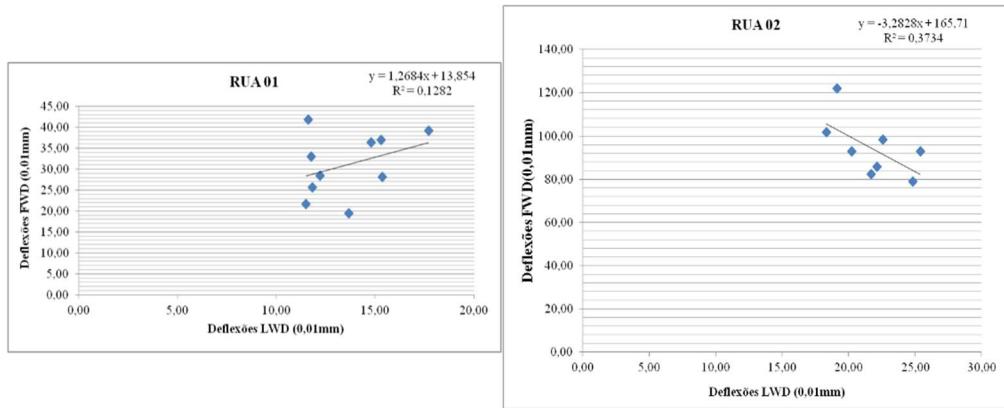
4.1.3. Análise de correlações e de regressão linear entre as medidas de deflexões

Na continuidade das análises buscaram-se correlacionar as medições de deflexões aferidas pelos equipamentos FWD *versus* LWD.

Foram plotados os gráficos de dispersão, ajustadas equações de regressão e informados os coeficientes de determinação (R^2) e de Pearson (r).

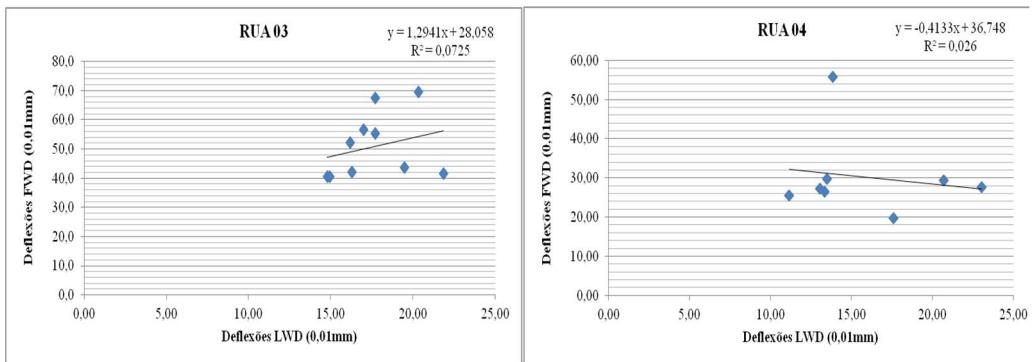
Estabelecidas as equações de regressão dos gráficos apresentados, nota-se o comportamento anômalo das deflexões medidas através das inclinações variadas das linhas de tendência. Além disso, foram verificados valores baixos para os coeficientes de determinação (R^2) para as ruas avaliadas, sendo o valor de $R^2 = 0,3734$ (Rua 02), o maior valor encontrado entre todas elas, conforme os Gráficos 5 e 6.

Gráficos 5 - Gráficos de regressão linear entre medidas de deflexão do LWD x FWD para as Ruas 1 e 2



Fonte: O autor.

Gráficos 6 - Gráficos de regressão linear entre medidas de deflexão do LWD x FWD para as Ruas 3 e 4



Fonte: O autor.

Importante salientar que a Rua 2 é um pavimento com quase 20 anos de operação, composto por revestimento asfáltico em CBUQ com espessura de 5 cm, base em brita graduada com 15 cm e sub-base em saibro bruto com 28 cm de espessura.

Os resultados também mostraram que não foi possível determinar uma correlação de Pearson (r) confiável entre os dois ensaios realizados, pois não foram encontrados valores expressivos na comparação entre as medidas de deflexões do LWD e FWD, conforme a Tabela 28.

Tabela 28 - Valores de correlação pelo coeficiente de Pearson entre LWD e FWD

Rua	Coeficiente de Pearson (r)	Correlação
-----	--------------------------------	------------

1	0,36	Fraca positiva
2	-0,61	Moderadamente forte negativa
3	0,27	Fraca positiva
4	-0,16	Fraca negativa

Fonte: O autor

Em Rodrigues (2018), o coeficiente de Pearson indicou que há forte correlação entre as medidas de deflexões entre os equipamentos LWD e Viga Benkelman nos Trechos 2 e 4 (estruturas de pavimentos compostas por revestimento em CBUQ mais delgada, de espessura de 5 cm, sobre base granular), com valores iguais a 0,95 e 0,92, respectivamente. O coeficiente também demonstrou que há forte correlação entre as deflexões entre o LWD e o Ensaio com Placa para esses trechos.

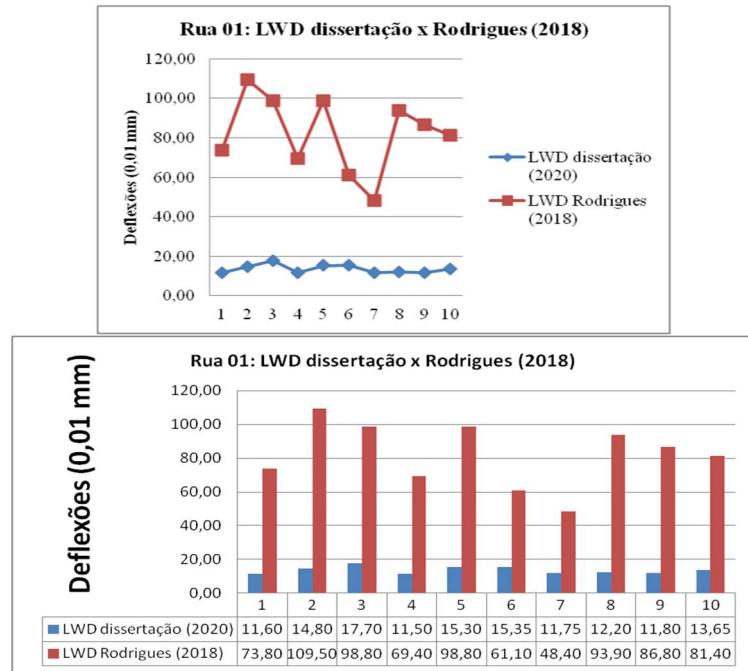
No entanto, conforme o autor, não houve boa correlação linear entre as medidas de deflexão entre LWD e Viga Benkelman e entre LWD e Placa em estruturas de pavimentos compostas por camadas de revestimento asfáltico de 10 cm (5 cm de CBUQ e 5 cm de PMQ), como também em estruturas de revestimento asfáltico sobre paralelepípedos.

Nery (2020), não encontrou valores expressivos para o coeficiente de correlação de Pearson (r) na comparação entre as deflexões do LWD e FWD. Para os segmentos 01 e 03, foi obtida uma correlação moderada. Para os demais segmentos a correlação foi fraca ou ínfima. Para os segmentos compostos por reforço em pedra pulmão (segmentos 01 e 06), o coeficiente (r) variou de 0,11 até 0,50; e para os segmentos compostos por reforço em areia (segmentos 02, 03, 04 e 05), o coeficiente (r) variou de -0,50 até 0,15.

4.1.4. Evolução das deflexões no pavimento

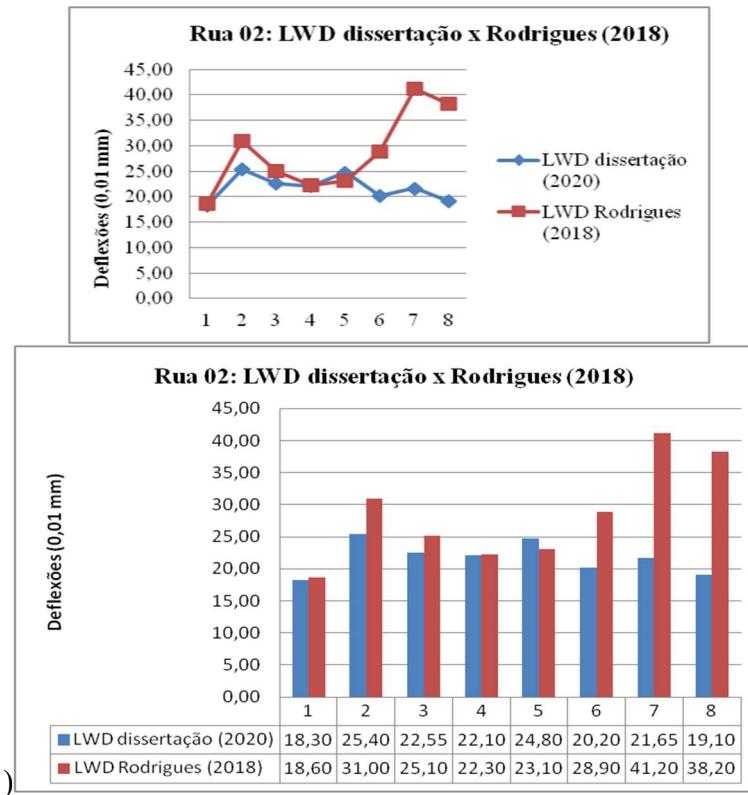
Rodrigues (2018) realizou levantamentos deflectométricos com o LWD nos mesmos pontos deste estudo. Os Gráficos 7 a 10 ilustram o comparativo entre as medidas de deflexão (D_0) determinados por Rodrigues (2018) e por esta pesquisa para cada rua avaliada.

Gráficos 7 - Comparativo entre medidas deflectométricas do LWD (Dissertação versus Rodrigues)



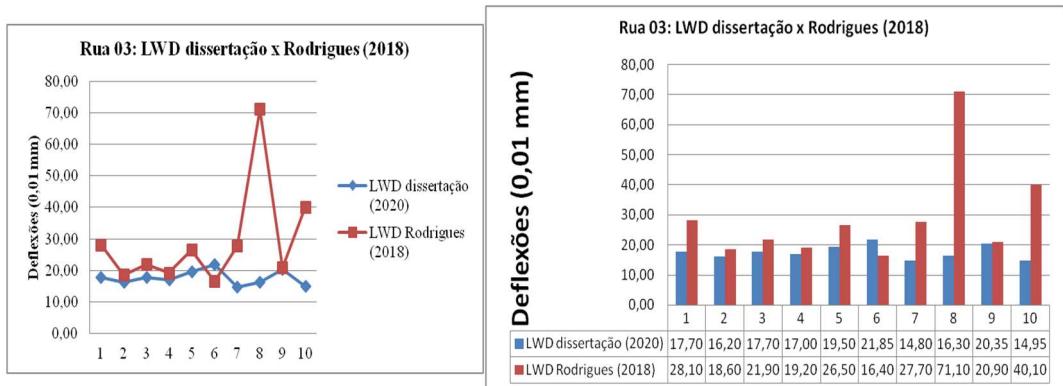
Fonte: O autor

Gráficos 8 - Comparativo entre medidas deflectométricas do LWD (Dissertação versus Rodrigues)



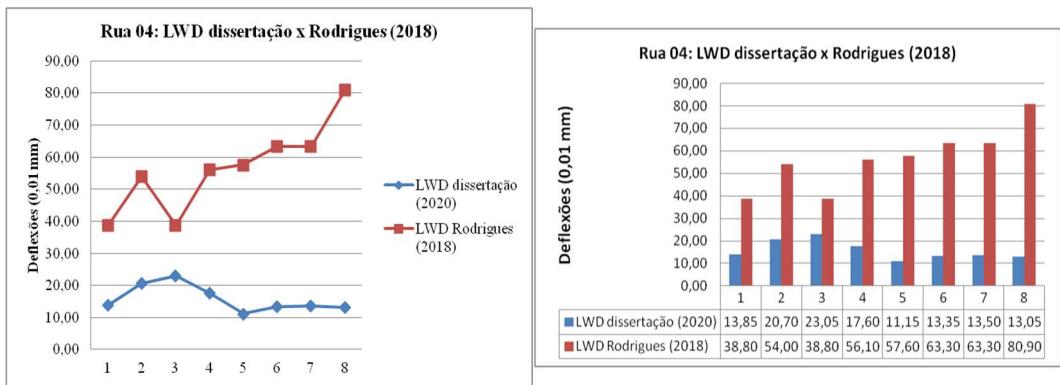
Fonte: O autor

Gráficos 9 - Comparativo entre medidas deflectométricas do LWD (Dissertação versus Rodrigues)



Fonte: O autor

Gráficos 10 - Comparativo entre medidas deflectométricas do LWD (Dissertação versus Rodrigues)



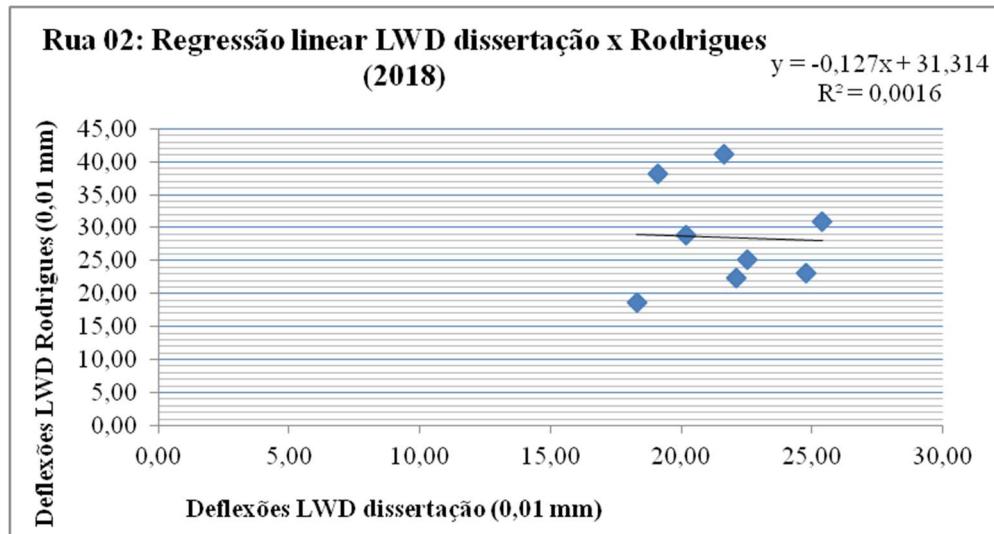
Fonte: O autor

Os resultados mostram que as deflexões aferidas por Rodrigues (2018) foram maiores que as aferidas por esta pesquisa para as Ruas 01 e 04, mesmo não havendo nenhum processo de restauração dos pavimentos nesse intervalo de tempo. Para as Ruas 02 e 03, não houve aumento das deflexões entre ambos os ensaios, com exceção dos pontos 7 e 8 da Rua 02, que foram medidos sobre remendos asfálticos realizados pela equipe de conservação da Prefeitura de Joinville.

Ainda, para a Rua 02, verificou-se uma pequena uniformidade entre as medidas realizadas com o LWD desta pesquisa quando comparado da pesquisa com o levantamento realizado por Rodrigues (2018), conforme o Gráfico 12. No entanto, esse comportamento não se refletiu no coeficiente de Pearson, que indicou uma correlação (- 0,04), de acordo com a

Tabela 29, e nem através do modelo de regressão entre as medidas de deflexão ($R^2 = 0,0016$), de acordo com o Gráfico 11.

Gráfico 11 - Gráficos de regressão linear do LWD da pesquisa versus Rodrigues (2018) para a Rua 2



Fonte: O autor

Para a Rua 04 houve a melhor correlação entre as medidas com o LWD da pesquisa *versus* o LWD de Rodrigues (2018), cujo coeficiente que foi de ($r = -0,52$).

Tabela 29 - Valores de correlação pelo coeficiente de Pearson entre LWD (Dissertação *versus* Rodrigues)

Relação entre medidas de deflexão	Rua 1	Rua 2	Rua 3	Rua 4
LWD Rodrigues (2018) x LWD	0,47	-0,04	-0,42	-0,52
Dissertação (2020)				

Fonte: O autor

Para os demais segmentos, as correlações foram fracas. Conforme os resultados encontrados, destaca-se a alternância entre correlação positiva e negativa, fato que traz incerteza sobre a tendência de comportamento entre as leituras registradas, principalmente para as Ruas 01 e 03, as quais possuem camadas rígidas em sua estrutura (galeria de concreto e paralelepípedos), respectivamente.

4.2. DETERMINAÇÃO DOS VALORES DOS MÓDULOS EQUIVALENTES RETROANALISADOS

Os valores dos módulos das camadas constituintes do pavimento foram obtidos a partir da retroanálise das bacias de deflexão determinadas através do FWD. As análises foram realizadas através do *software* BackMeDiNa, conforme descrito no item 2.4.10.2 da Metodologia.

Nos procedimentos de retroanálise, a camada de reforço do subleito encontrada na estrutura da Rua 04 foi considerada como parte conjunta da camada de sub-base, já que foi utilizado o mesmo material para ambas (pedra rachão). Desta forma, foi determinado um valor único de módulo para os materiais a partir da sub-base.

Para a Rua 03, onde há uma camada de paralelepípedos abaixo das duas camadas de revestimento asfáltico, a mesma foi considerada como granular para inserção dos dados no programa.

Foram retroanalisadas 10 bacias de deflexão para cada Rua. Na Rua 01, três bacias (estacas 4, 9 e 10) apresentaram erro de leitura e não foram retroanalisadas. As Tabelas 30 a 33 mostram os módulos equivalentes calculados nas diversas camadas do pavimento encontrados para cada rua, e a Tabela 34 mostra um resumo dos resultados.

Tabela 30 - Valores médios dos módulos equivalentes retroanalisados a partir do FWD (Rua 01)

Estaca	Módulo Equivalente (MPa) - Rua 01			
	Revestimento	Base	Sub-base	Sub-leito
01	8.072	662	497	162
02	8.438	825	750	175
03	5.000	750	450	169
04				
05	6.600	963	450	206
06	8.500	750	963	221
07	8.500	675	827	214
08	8.500	700	813	253
09				
10				
Média	7.659	761	679	200
Desvio Padrão (σ)	1.360	105	210	33
M min	5.000	662	450	162

M max	8.500	963	963	253
CV%	18	14	31	16

Fonte: O autor

Tabela 31 - Valores médios dos módulos equivalentes retroanalisados a partir do FWD
(Rua 02)

Estaca	Módulo Equivalente (MPa) - Rua 02			
	Revestimento	Base	Sub-base	Sub-leito
01	3.938	89	338	88
02	3.938	39	148	62
03	4.156	180	125	169
04	4.000	150	156	150
05	4.300	200	125	150
06	5.513	60	750	206
07	4.200	235	263	182
08	3.938	100	296	110
09	4.430	88	570	110
10	4.483	33	625	99
Média	4.290	117	340	133
Desvio Padrão (σ)	475	70	229	46
M min	3.938	33	125	62
M max	5.513	235	750	206
CV%	11	60	68	35

Fonte: O autor

Tabela 32 - Valores médios dos módulos equivalentes retroanalisados a partir do FWD
(Rua 03)

Estaca	Módulo Equivalente (MPa) - Rua 03			
	Revestimento	Base	Sub-base	Sub-leito
01	4.238	2.888	263	90
02	6.780	3.544	395	113
03	6.700	1.875	675	113
04	5.063	2.250	788	90
05	7.700	5.550	750	109
06	9.113	9.000	750	113

07	8.000	7.735	890	109
08	8.750	6.375	600	144
09	6.780	1.838	132	113
10	7.800	5.800	750	113
Média	7.092	4.686	599	111
Desvio Padrão (σ)	1.533	2.565	251	15
M min	4.238	1.838	132	90
M max	9.113	9.000	890	144
CV%	22	55	42	13

Fonte: O autor

Tabela 33 - Valores médios dos módulos equivalentes retroanalisados a partir do FWD
(Rua 04)

Estaca	Revestimento	Módulo Equivalente (MPa) - Rua 04			
		Base	Sub-base	Reforço subleito	Subleito
01	2.900	1.250	63	84	84
02	4.500	4.500	394	189	95
03	3.100	1.500	150	189	102
04	5.600	5.600	525	704	131
05	6.100	6.100	525	563	144
06	7.300	7.300	887	845	210
07	6.350	6.350	481	845	148
08	6.500	6.500	550	985	142
09	6.400	6.400	722	704	132
10	6.600	6.600	722	688	144
Média	5.535	5.210	502	580	133
Desvio Padrão (σ)	1.522	2.149	253	316	35
M min	2.900	1.250	63	84	84
M max	7.300	7.300	887	985	210
CV%	28	41	50	55	27

Fonte: O autor.

Tabela 34 - Resumo dos resultados dos módulos retroanalisados

Rua	Valores médios dos módulos equivalentes retroanalisados - FWD (MPa)				
	Revestimento	Base	Sub-base	Ref. Subleito	Subleito
01	7.659	761	679	-	200
02	4.290	117	340	-	133

03	7.092	4.686	599	-	111
04	5.535	5.210	502	580	133

Fonte: O autor

Verifica-se que menores valores de deflexão resultam em uma melhor resposta da estrutura em termos de rigidez, traduzidos pelos maiores valores de módulo, a exemplo das estacas de nº 6, para ambas as Ruas 2 e 4, conforme resultados apresentados nas Tabelas 29 a 31, respectivamente.

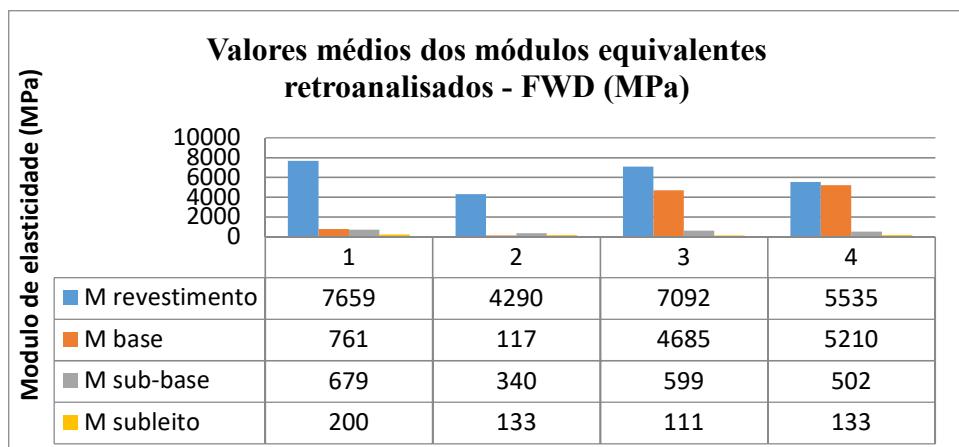
Franco *et al.* (2019), em estudos realizados em uma rodovia federal de médio a alto volume de tráfego, também encontraram maiores valores de módulos para a camada de revestimento asfáltico (10519 e 15000 MPa) nos segmentos que apresentaram os menores valores de deflexão máxima média (462 e 209 µm), denominados 2 e 4, respectivamente.

Tanto para a Rua 1 como para a Rua 3 essa relação não se confirmou. Talvez pelas camadas constituintes destes pavimentos, as quais possuem elementos rígidos em suas estruturas.

A partir da avaliação da Figura 44 é verificada certa proximidade entre os valores médios dos módulos equivalentes calculados para a camada de revestimento asfáltico, sobretudo para os pavimentos das Ruas 1 e 3, e em que se verificou maior uniformidade entre as leituras deflectométricas.

Ao considerar os resultados obtidos, são identificados valores superiores a 7000 Mpa para ambos os revestimentos asfálticos executados no ano de 2017, valores entre 5000 e 6000 Mpa para o pavimento restaurado em 2016, e por fim, os menores valores foram obtidos na Rua 2, a qual apresenta o pavimento mais antigo entre as quatro ruas avaliadas, e que apresentou um valor médio de 4000 Mpa.

Figura 44 - Comparativo entre valores médios dos módulos equivalentes



Fonte: O autor

Para Nery (2020), os segmentos 03, 04 e 06, avaliados estruturalmente há menos de um ano de sua implantação e em fase de consolidação das deflexões, claramente foram obtidos maiores valores de deflexão e menores valores de módulo de elasticidade equivalente quando em comparação aos segmentos 01, 02 e 05, os quais apresentavam cinco anos quando de suas avaliações.

4.3. ANÁLISE DA VIDA ÚTIL DOS PAVIMENTOS

Neste item são realizadas as análises quanto à vida útil dos pavimentos em relação aos critérios mecanísticos-empíricos pelo MeDiNa e pela Metodologia do DNER – PRO 269/94.

4.3.1. Espessura de Reforço (FWD x LWD)

Neste item, foi realizado o dimensionamento da espessura de reforço para os dois levantamentos deflectométricos (FWD e LWD) utilizando a Metodologia do DNER – PRO 269/94.

Para o cálculo da espessura de reforço, o solo do subleito deve ser classificado segundo o seu comportamento à resiliência. Desta forma, a Tabela 35 mostra a altura da camada granular (conforme descrito anteriormente no item 3.1.3 – Caracterização das Ruas) e o tipo de solo de fundação de cada rua do estudo conforme critério de classificação deste método de dimensionamento, onde se adotou o solo do subleito discriminado no projeto da Rua 4 e, que foi avaliado com o CBR abaixo de 5%, conforme ANEXO C.

Tabela 35 - Classificação dos solos das ruas pesquisadas

Rua	Altura camada granular (Hcg)	Tipo do Solo
Rua 01	45,0	III
Rua 02	53,0	III
Rua 03	20,0	III
Rua 04	65,0	III

Fonte: O autor

Na sequência, tendo as deflexões características calculadas a partir das expressões matemáticas apresentadas no item 3.4.1.2, o Número N de projeto e as deflexões admissíveis,

foi possível calcular a espessura de reforço, conforme as equações apresentadas no item 2.4.11. A Tabela 36 apresenta os valores das espessuras das camadas de reforço determinadas a partir de dados dos levantamentos deflectométricos com LWD e FWD.

Tabela 36 - Dimensionamento de espessuras de reforço (FWD x LWD)

Ruas	Levantamento com FWD						Levantamento com LWD					
	N	Dadm (0,01mm)	Dc (FWD) (0,01mm)	Dc (Vb) (0,01mm)	Hef (cm)	Hef (adot.)	HR (cm)	Dc (0,01mm)	Dc (Vb) (0,01mm)	Hef (cm)	Hef (adot.)	HR (cm)
1	5,00E+06	77,50	38,64	51,00	14,21	5,00	5,10	15,71	68,55	10,15	5,00	5,10
2	8,57E+06	69,90	107,84	142,35	3,09	3,16	9,10	24,29	63,83	11,07	5,00	6,60
3	5,00E+06	77,50	62,00	81,83	8,24	8,39	0,50	19,95	66,22	10,57	10,50	-2,3
4	2,00E+07	59,00	41,01	54,14	6,05	6,16	7,50	19,99	66,20	10,74	10,00	2,30

Fonte: O autor

Os resultados mostraram que as espessuras de reforço foram superiores com os levantamentos deflectométricos realizados com o FWD, principalmente para as Ruas 02 e 04. Isso pode ser explicado pela diferença dos valores das deflexões características calculadas.

Desta forma, fica evidente que a escolha do equipamento para a realização dos levantamentos deflectométricos influencia nos resultados das espessuras de reforço de uma restauração.

Para o reforço do levantamento pelo LWD, as Ruas 01, 02 e 04 apresentaram uma espessura de reforço de 5,10; 6,60 e 2,30 cm, respectivamente. Para o equipamento FWD as espessuras de reforço foram de 5,10; 9,10 e 7,50 cm para as Ruas 01, 02 e 04, respectivamente.

A Rua 3 apresentou valor negativo (-2,30 cm) para a espessura de reforço para o levantamento realizado com o LWD. Isso aconteceu porque a deflexão característica foi muito menor que a admissível, e com isso, toda a espessura existente de revestimento asfáltico colabora com a estrutura do pavimento, ao passo que, não é necessário executar uma camada de reforço. Para o equipamento FWD, com deflexão característica muito próxima da admissível, dimensionou-se apenas 0,50 cm de camada de reforço, a qual torna-se desprezível.

Rodrigues (2018) encontrou valores subdimensionados para o LWD em sua avaliação no cálculo de reforço para a mesma Rua 02 utilizando o Método PRO 11/79, quando comparado com as deflexões características do ensaio realizado com a Viga Benkelman.

De acordo com Nery (2020), as simulações realizadas em sua pesquisa através do MeDiNa permitiram destacar a clara vantagem da aplicação do método mecanístico-empírico de dimensionamento, uma vez que as propriedades das camadas do pavimento são abordadas no cálculo, fato que reflete uma maior credibilidade para a definição das espessuras de reforço e, ao que tudo indica, propicia maiores valores a serem adotados frente ao dimensionamento com o PRO 11/79.

Franco *et al.* (2019) aplicaram a Metodologia PRO 269/94 em seus estudos e por este procedimento nenhum dos quatro segmentos avaliados necessitaram de reforço em concreto asfáltico. No entanto, utilizando o Método MeDiNa, e considerando a fresagem da camada do revestimento existente, determinaram espessuras de 13,0, 5,0, 12,0 e 5,50 centímetros de concreto asfáltico para os mesmos segmentos.

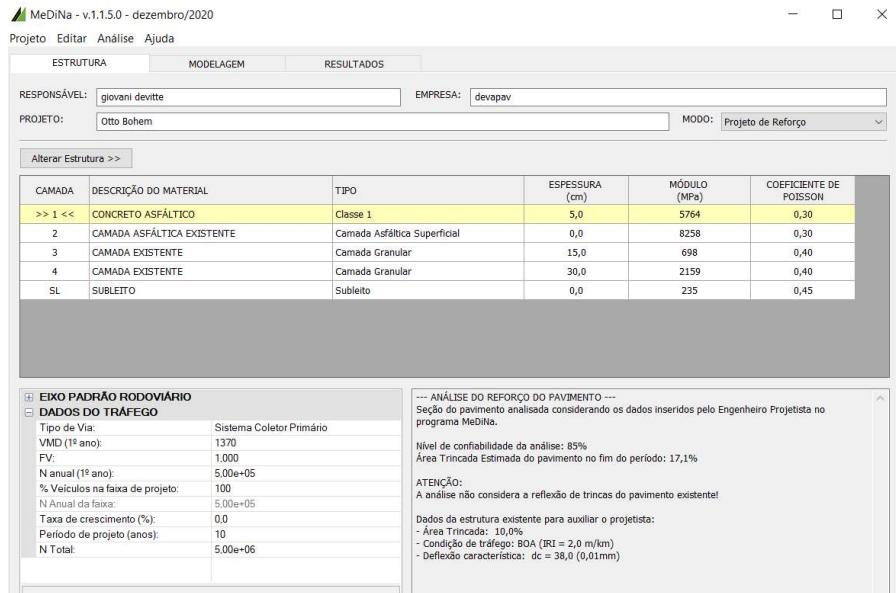
4.3.2. Análise Mecanística-Empírica (Método MeDiNa)

Neste item são realizadas análises quanto à vida útil do pavimento em relação ao critério de fadiga, considerando-se o limite de 30% da área trincada utilizando o *software* MeDiNa.

Por não se dispor de equações de fadiga para a mistura asfáltica das ruas pesquisadas, foram realizadas simulações através da utilização dos parâmetros k_1 e k_2 das misturas nomeadas de Classe 1, pré-determinadas no banco de dados do *software* MeDiNa. A Classe 1 é que se aproxima mais das misturas asfálticas aplicadas sob a supervisão da Prefeitura de Joinville/SC.

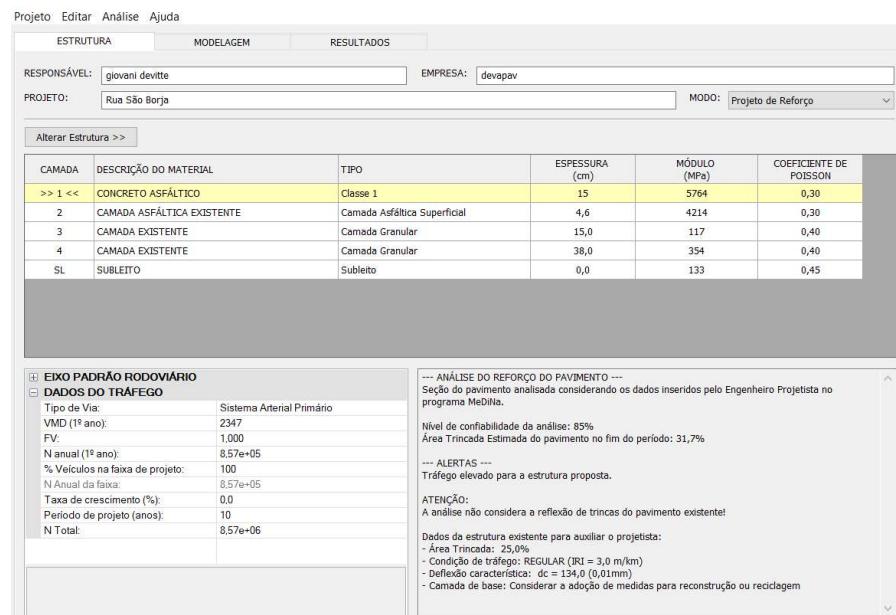
As Figuras de 45 a 48 mostram os resultados do dimensionamento de cada Rua. A Tabela 37 apresenta um resumo dos resultados obtidos pelo MeDiNa e pelo PRO 269/94.

Figura 45 - Dimensionamento pelo Método MeDiNa da Rua 01



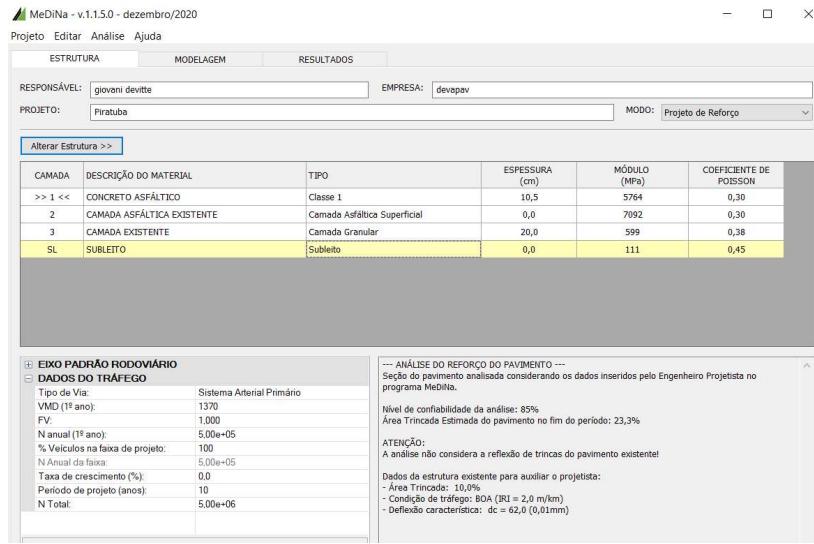
Fonte: O autor

Figura 46 - Dimensionamento pelo Método MeDiNa da Rua 02



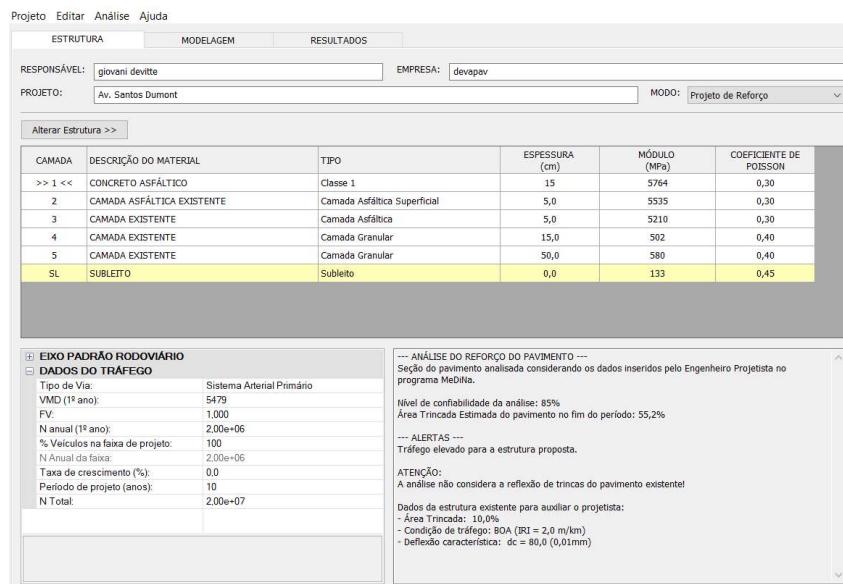
Fonte: O autor

Figura 47 - Dimensionamento pelo Método MeDiNa da Rua 03



Fonte: O autor

Figura 48 - Dimensionamento pelo Método MeDiNa da Rua 04



Fonte: O autor

Tabela 37 - Espessuras de Reforço para o Método Medina e PRO 269/94

Ruas	N	DNER 269/94 (FWD)		Método Medina	
		HR (cm)	HR (cm)	% de área trincada	
1	5,00E+06	5,10	-	-	
2	8,57E+06	7,10	15,0*	31,70	
3	5,00E+06	0,50	-	-	

4	2,00E+07	7,50	15,0 ¹	55,20
---	----------	------	-------------------	-------

Fonte: O autor

Embora não tenha sido determinado valores de espessura de reforço para as Ruas 02 e 04 (utilizando a mistura Classe 1), as simulações realizadas neste item permitem destacar a clara vantagem da aplicação do método mecanístico-empírico de dimensionamento, uma vez que as propriedades das camadas do pavimento são abordadas no cálculo, fato que reflete uma maior credibilidade para a definição das espessuras de reforço e, ao que tudo indica, maiores valores a serem adotados no dimensionamento.

As espessuras de reforço calculadas através da análise mecanística-empírica pelo método MeDiNa apresentaram valores superiores quando comparadas com o Método do DNER PRO 269/94 para as Ruas 02 e 04, ao passo que seria necessária uma espessura ainda superior aos 15,0 cm para atender o critério de 30% de trincamento (ou redimensionar a estrutura com a inclusão de classes de revestimento asfáltico de maior qualidade).

Para as Ruas 01 e 03, a análise mecanística-empírica pelo Método Medina mostrou que não seria necessário realizar um reforço na estrutura do pavimento e a metodologia do DNER PRO 269/94 apresentou uma espessura de reforço de 5,10 cm para a Rua 01.

É possível observar, para um tráfego elevado, que a análise mecanística-empírica aponta espessuras superiores quando comparados com a metodologia do DNER PRO 269/94. Agora, quando o tráfego é mais leve, as espessuras calculadas pelo Medina são inferiores em relação ao DNER PRO 269/94. De fato, quando se observam as patologias em campo é possível verificar que as Ruas 02 e 04 já necessitariam de uma intervenção. Já as Ruas 01 e 03 se encontram em bom estado de conservação e não necessitariam de reforço.

O fato de serem levadas em consideração as características de rigidez do material e da fadiga do revestimento asfáltico, é possível acreditar que o dimensionamento realizado por uma análise mecanística-empírica vai levar a uma previsão mais assertiva da vida útil do pavimento.

Os dimensionamentos completos realizados pelo Método MeDiNa para as ruas pesquisadas estão listados nos APÊNDICES O, P, Q e R.

Portanto, quando se apresentam valores de tráfego elevado, a utilização do Método DNER PRO 269/94 pode levar à redução da vida útil de projeto. Agora, quando o tráfego é

¹ Valor máximo permitido para camada de reforço pelo Medina. Acima disso são sugeridas outras alternativas de restauração

leve, a utilização do PRO 269/94 pode levar a um superdimensionamento da estrutura de reforço.

A Tabela 38 apresenta a estimativa de vida útil do pavimento através da análise mecanística-empírica das Ruas 02 e 04 com as espessuras de reforço calculadas pelo Método PRO 269/94.

Tabela 38 - Vida útil do pavimento

Ruas	N (10 anos)	DNER 269/94 (FWD)		Análise Mecanística-Empírica	
		HR (cm)	Meses	Anos	
2	8,57E+06	7,10	53	4,4	
4	2,00E+07	7,50	70	5,8	

Fonte: O autor

A Tabela 38 mostra uma redução significativa da vida útil do pavimento quando se faz uma análise mecanística-empírica com os resultados da espessura de reforço calculados pelo Método do DNER PRO 269/94. Vale ressaltar que essa redução da vida útil foi constatada quando se tem um tráfego elevado (acima de 5×10^6).

Os autores Souza Júnior (2018) e Lopes (2019) também estabeleceram comparativos entre os métodos de dimensionamento de reforço dos pavimentos e concluíram que soluções provenientes do dimensionamento com método PRO 011/79 podem levar à redução da vida útil de projeto, inferior a 10 anos.

Franco *et al.* (2019) aplicaram o PRO 269 em seus estudos e por este procedimento nenhum dos quatro segmentos avaliados necessitaram de reforço em concreto asfáltico. No entanto, utilizando o MeDiNa, e considerando a fresagem da camada do revestimento existente, determinaram espessuras de 13, 5, 12 e 5,5 cm para os mesmos segmentos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi realizar o dimensionamento do reforço de quatro ruas de Joinville através de duas metodologias (Análise Mecânica-empírica pelo *software* MeDiNa e pelo DNER PRO 269/94). Ainda, realizar uma comparação dos levantamentos deflectométricos através do LWD e FWD. As principais conclusões obtidas foram:

- Ao longo da pesquisa, tivemos dificuldades para programar com antecedência os testes com o equipamento FWD: como o mesmo foi conseguido por empréstimo, pois os valores para locação são altíssimos, os mesmos tiverem de ser realizados durante um encaixe na programação dos serviços prestados pela empresa detentora do equipamento junto à concessionária Arteris. Sendo assim, foram realizados em período noturno e com chuva, com horários e temperaturas do ar e do pavimento diferentes dos testes realizados com o equipamento LWD, os quais foram executados em período diurno e com sol.
- Além desta, também encontramos dificuldades para a obtenção dos projetos de recuperação das ruas analisadas junto à Prefeitura Municipal de Joinville.
- Tendo em vista que cada equipamento para levantamento das deflexões apresenta diferentes configurações de carga e princípios de funcionamento, foram verificadas diferenças entre os valores das deflexões obtidas.
- Os resultados dos levantamentos deflectométricos mostraram que os valores de deflexão medidos pelo LWD foram inferiores aos medidos pelo FWD, com o intervalo de valores compreendidos entre $11,15 \times 10^{-2}$ mm e $25,40 \times 10^{-2}$ mm para o LWD; e entre $19,40 \times 10^{-2}$ mm e $121,90 \times 10^{-2}$ mm para o FWD.
- Não foram obtidos modelos de regressão estatisticamente significantes na comparação entre leituras com o LWD e o FWD utilizados na pesquisa.
- Para as Ruas 2 e 4 foram obtidos maiores valores de deflexão e menores valores de módulo de elasticidade equivalente quando em comparação aos segmentos 01 e 03, as quais foram executadas mais recentemente se comparadas às primeiras.
- Estas diferenças encontradas podem estar associadas à diferença das camadas constituintes das ruas analisadas, bem como a falta de correção da temperatura dos ensaios realizados para uma temperatura de referência.
- As espessuras de reforço calculadas através da metodologia do DNER PRO 269/94 para o FWD e LWD mostraram diferenças significativas, ao passo que fica evidente

que a escolha do equipamento para a realização dos levantamentos deflectométricos influencia nos resultados das espessuras de reforço de uma restauração.

- As espessuras de reforço calculadas através da análise mecanística-empírica pelo método MeDiNa apresentaram valores superiores quando comparadas com o Método do DNER PRO 269/94 para tráfego elevado e valores inferiores para tráfego leve. No dimensionamento do reforço para tráfego elevado, o uso do Método do DNER 269-94 pode levar a uma redução da vida útil do pavimento em até 56%.
- Em virtude dos resultados verificados na pesquisa, não se aconselha o emprego do equipamento LWD na metodologia de reforço de pavimentos asfálticos urbanos, visto que os resultados podem levar ao dimensionamento excessivo ou inferior ao necessário.
- Aconselha-se o emprego do equipamento LWD para o controle deflectométrico na execução das camadas granulares dos pavimentos urbanos, pela facilidade e rapidez na obtenção dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERNAZ, C. A. V. **Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão.** 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/12835/1/Arquivototal.pdf>. Acesso em: 15 de jun de 2019.
- ALBUQUERQUE, T.P. **Índice de condição baseado em defeitos superficiais para gerência de pavimentos urbanos.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017. Disponível em: <https://www.lume.ufrj.br/bitstream/handle/10183/163292/001023027.pdf?sequence=1>. Acesso em: 18 de abril de 2020.
- BALBO, J. T. **Restauração de pavimentos urbanos – Dificuldades e diretrizes para soluções.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 8. 1997, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997. p. 1-8. Disponível em: <https://www.estantevirtual.com.br/livros/associacao-brasileira-de-pavimentacao/anais-da-viii-reuniao-anual-de-pavimentacao/1339709678>. Acesso em: 15 de jun de 2019.
- BENEDETTO, A.; TOSTI, F. & DOMENICO, L. di. **Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer.** Journal of Terramechanics, v. 49, n. 1, p. 1-12, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002248981100084X>. Acesso em: 15 de jun de 2019.
- BENEVIDES, S. A. S. **Modelos de desempenho de pavimentos asfálticos para um sistema de gestão de rodovias estaduais do Ceará.** Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. da; CERATTI, J. A. P; SOARES; J.B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Ed. Gráfica Imprinta, 2006. 504 p.
- BORGES, C. B. S. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com Viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/79447/188421.pdf;jsessionid=2959E16769060E962186914C764A4C64?sequence=1>. Acesso em: 15 de jun de 2019.
- BRASIL. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativa de população dos municípios brasileiros.** Rio de Janeiro, RJ: Instituto Brasileiro de Geografia, 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/joinville/panorama>. Acesso em: 15 de jun de 2019.
- CALTRANS - California Department of Transportation / Caltrans Division of Maintenance. **Maintenance technical advisory guide: flexible pavement preservation.** 2. ed. Sacramento,

v. 1, 2008. Disponível em: <http://www.dot.ca.gov/hq/maint/MTA_GuideVolume1Flexible.html>. Acesso em: 15 de fev. de 2020.

CARDOSO, S. H. **Faixas de Módulos Dinâmicos (Elásticos) Obtidos por Retroanálises Durante Sete Anos.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. **Anais** [...]. Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, 1995. p. 377-401. Disponível em: <https://www.estantevirtual.com.br/livros/associacao-brasileira-de-pavimentacao/anais-da-viii-reuniao-anual-de-pavimentacao/1339709678>. Acesso em: 15 de jun de 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (Brasil). **Pesquisa Rodoviária 2017 – Relatório Gerencial.** Disponível em: [http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2016/Relat%C3%B3rio%20Gerencial/Pesquisa%20CNT%20\(2016\)%20-%20FINAL%20-%20WEB%20\(ALTA\).pdf](http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2016/Relat%C3%B3rio%20Gerencial/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20FINAL%20-%20WEB%20(ALTA).pdf). Acesso em: 15 de jun de 2019.

_____. **Pesquisa Rodoviária 2019** – Relatório Gerencial. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/>. Acesso em: 20 de mar de 2020.

CORREIA E SILVA, C.F.S. **Análise de tensões em pavimentos a partir de modelo físico instrumentado.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

DYNATEST – Dynatest Engenharia Ltda. Disponível em: <http://dynatest.com.br/>. Acesso em: 20 de mar de 2020.

DNIT - BRASIL. Ministério dos Transportes (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** Brasília, DF: Ministério dos Transportes, 2006. 314 p. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/ípr_new/..%5Carquivos_internet%5Cípr%5Cípr_new%5Cmanuais%5CManual_de_Restauracao.pdf. Acesso em: 15 de jun de 2019.

_____. **Pavimentos – Calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”— Procedimento 132/2010.** Brasília, DF: Ministério dos Transportes, 2010a. 21 p. Disponível em: http://ípr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit132_2010_pro.pdf. Acesso em: 15 de jun de 2019.

ELHAKIM, A. F.; ELBAZ, K.; AMER, M. I. The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction. **HBRC Journal**, v. 10, n. 3, p. 298-307, 2014. Disponível em:https://www.researchgate.net/profile/Amr_Elhakim/publication/260010843_The_use_of_light_weight_deflectometer_for_in_situ_evaluation_of_sand_degree_of_compaction/links/54a2562b0cf267bdb902cf1c/The-use-of-light-weight-deflectometer-for-in-situ-evaluation-of-sand-degree-of-compaction.pdf. Acesso em: 03 de jun de 2019.

FERRI, Santi. **Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos.** 2013. 331 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-29072013-121302/pt-br.php>>. Acesso em: 03 de jun de 2019.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

_____. **BackMeDiNa - Manual de Utilização**. Versão 1.1. Rio de Janeiro, 2018a.

_____. **MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional**. Manual de Utilização. Versão 1.0.0. Rio de Janeiro, 2018b.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. 2016. 262f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

FRITZEN, M. A.; MOTTA, L. M. G. (2018). **Levantamento deflectométrico com o uso do FWD (Falling Weight Deflectometer) no anel viário principal do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora**. Relatório Final. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 20p.

GOMES, L.H.C. **Equivalência operacional entre equipamentos deflectométricos - estudo de caso em rodovia localizada em Ouro Branco/MG**. 2012. 86f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012. Disponível em: <https://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/luiz-henrique.pdf>. Acesso em: 16 de fev. de 2020.

GONTIJO, P. R. A.; GUIMARÃES, F. H. R. & NOGUEIRA, C. de L. **Metodologias Brasileiras para Avaliações das Características Funcionais e Estruturais de Pavimentos Rodoviários - Estado da Arte**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28., 1994, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1994. p. 501-529. Disponível em: <https://www.estantevirtual.com.br/livros/associacao-brasileira-de-pavimentacao/anais-da-viii-reuniao-anual-de-pavimentacao/1339709678>. Acesso em: 15 de jun de 2019.

HORAK, E.; MAINA, J.; GUIAMBA, D.; HARTMAN, A. Correlation study with the light weight deflectometer in South Africa. **Document Transformation Technologies**, 27th Annual Southern African Transport Conference, p. 304-312, jul. 2008. Disponível em: https://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/handle/10204/2437Horak_2008.pdfsequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 16 de mar de 2020.

_____. **Joinville Cidade em Dados 2019**. Joinville: Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/publicacoes/joinville-cidade-em-dados-2019/>. Acesso em: 03 de fev de 2020.

KNABBEN, Ramon Mendes; CARPIO, Joe Arnaldo Villena del. **Como usar o software MeDiNa**: o guia prático para a utilização do software MeDiNa de dimensionamento de pavimentos flexíveis. 2020. E-Book. Disponível em: <<https://www.ramonknabben.com.br>>. Acesso em: 08/04/2021.

LOPES, J. **Contributo para o estudo da utilização do deflectómetro de impacto ligeiro**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010. Disponível em: <https://docplayer.com.br/14973812-Contributo-para-o-estudo-da>

utilizacao-do-deflectometro-de-impacto-ligeiro-dissertacao-para-a-obtencao-do-grau-de-mestre-em.html. Acesso em: 15 de jun de 2019.

LUZ, L. C. da. **Desempenho de revestimentos asfálticos executados em camada singular e integrados em rodovias de tráfego pesado: segmentos monitorados de Araranguá/SC.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/186528/PECV1088-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 de mar de 2020.

MACHADO, Ana Beatriz Alves dos Santos Baptista. **Contribuição para a avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias por métodos não destrutivos.** 2012. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Nova de Lisboa / Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2012. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/8637/1/Machado_2012.pdf>. Acesso em: 16 de mar de 2020.

MACHADO, Thiago. **Projeto de reforço para o pavimento flexível do anel viário da UFJF baseado no novo método de dimensionamento mecanístico-empírico nacional.** 2019. 132 f. Dissertação (mestrado acadêmico). Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2019. Disponível em <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/123456789/10157>. Acesso em: 02 de mar de 2021.

MACHADO, Thiago; MARQUES, Geraldo; ROCA, Marcos. Projeto de reforço para o pavimento flexível do anel viário da UFJF baseado no novo método de dimensionamento mecanístico-empírico nacional. **Revista Transportes**, v. 28, abr. 2020. Disponível em: www.anpet.org.br. Acesso em: 02 de mar de 2021.

MAGALHÃES, Bruno Alberto da Cunha. **Comparação de diferentes métodos de avaliação da capacidade de carga de pavimentos rodoviários.** 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade do Minho / Escola de Engenharia, Guimarães, 2015. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/40470>>. Acesso em: 17 de mar de 2020.

MARECOS, Vânia; SOLLA, Mercedes; FONTUL, Simona; ANTUNES, Vitor. Assessing the pavement subgrade by combining different non-destructive methods. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 135, p. 76-85, mar. 2017. Disponível em: <<https://www62.sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061817300028?via%3Dihub>>. Acesso em: 01 maio de 2020.

MEDINA, J. de *et al.* **Utilização de Ensaios Deflectométricos e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28., 1994, Belo Horizonte. *Anais* [...]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1994. p. 595-625. Disponível em: <https://www.estantevirtual.com.br/livros/associacao-brasileira-de-pavimentacao/anais-da-viii-reuniao-anual-de-pavimentacao/1339709678>. Acesso em: 15 de jun de 2019.

MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica dos pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, v. 23, 2005.

MIGLIACCIO, G. C. Et al. **Tecnicas de Mejora Continua de la Calidad de la Recoleccion de Datos em Sistemas de Gerencia de Capital de Infraestructura. Journal of Construction Engineering and Management**, v. 140, Issue 4 - April 2014. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0000686>. Acesso em: 18 de abril de 2020.

MORAES. Carla Gonçalves de. **Análise de bacias deflectométricas obtidas por 4 equipamentos do tipo Falling Weight Deflectometer (FWD)**. 2015. 280 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, 2015. Disponível em: <www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2015/2598-moraes-cg-tm-15-pdf>. Acesso em: 17 de mar de 2020.

NAZAAL, M. D. **Field evaluation of in-situ test technology for QC/QA during construction of pavement layers and embankments**, 2003.

NOBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

PREUSSLER, Leonardo Appel. **Contribuição ao estudo da deformabilidade de camadas de pavimento**. 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/.../Dissertacao_Leonardo_Preussler_Revisada.pdf>. Acesso em: 01 maio de 2020.

ROCHA FILHO, N. R. **Estudo de técnicas para avaliação estrutural de pavimentos por meio de levantamentos deflectométricos**. 1996. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura de Transportes) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA, São José dos Campos, SP, 1996. Disponível em: http://www.bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=000373787. Acesso em: 03 de jun de 2019.

RODRIGUES, P. R. **Medidas de deflexão em pavimentos asfálticos urbanos com o deflectômetro de peso leve**. 2018. Orientador: Prof. Dr. Edgar Odebrecht. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Tecnológicas. Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018. Joinville.

SALTAN, M.& TERZI, S. Modeling deflection basin using artificial neural networks with cross-validation technique in backcalculating flexible pavement layer moduli. **Advances in Engineering Software**, v. 39, n. 7, p. 588-592, 2008. Disponível em: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1351473>. Acesso em: 03 de jun de 2019.

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

ZANCHETTA, F. **Aquisição de dados sobre a condição dos pavimentos visando a implementação de um sistema de gerência de pavimentos urbanos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura de Transportes), São Carlos, SP, 2005.

APÊNDICE A – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TESTES

7

Ponto	Rua	Bordo	Coordenada X	Coordenada Y
E 01	Otto Boehm	Direito	713530.437	7088933.434
E 02	Otto Boehm	Direito	713579.955	7088940.879
E 03	Otto Boehm	Direito	713629.631	7088948.128
E 04	Otto Boehm	Direito	713679.133	7088955.646
E 05	Otto Boehm	Direito	713728.487	7088963.652
E 06	Otto Boehm	Direito	713777.493	7088973.973
E 07	Otto Boehm	Direito	713826.517	7088983.985
E 08	Otto Boehm	Direito	713875.479	7088994.248
E 09	Otto Boehm	Direito	713924.349	7089004.440
E 10	Otto Boehm	Direito	713973.310	7089014.685
Ponto	Rua	Bordo	Coordenada X	Coordenada Y
E 01	São Borja	Esquerdo	718564.304	7088558.385
E 02	São Borja	Esquerdo	718543.207	7088603.655
E 03	São Borja	Esquerdo	718521.725	7088648.876
E 04	São Borja	Esquerdo	718500.410	7088693.922
E 05	São Borja	Esquerdo	718479.099	7088739.325
E 06	São Borja	Esquerdo	718457.745	7088784.531
E 07	São Borja	Esquerdo	718436.389	7088829.822
E 08	São Borja	Esquerdo	718415.007	7088875.125
E 09	São Borja	Esquerdo	718393.657	7088920.404
E 10	São Borja	Esquerdo	718372.292	7088965.686
Ponto	Rua	Bordo	Coordenada X	Coordenada Y
E 01	Piratuba	Direito	715268.649	7093019.437
E 02	Piratuba	Direito	715317.863	7093011.528
E 03	Piratuba	Direito	715367.483	7093003.953
E 04	Piratuba	Direito	715416.409	7092995.736
E 05	Piratuba	Direito	715465.497	7092987.926
E 06	Piratuba	Direito	715514.852	7092979.883
E 07	Piratuba	Direito	715564.262	7092971.801
E 08	Piratuba	Direito	715564.262	7092971.801
E 09	Piratuba	Direito	715662.597	7092956.054
E 10	Piratuba	Direito	715711.910	7092948.220
Ponto	Rua	Bordo	Coordenada X	Coordenada Y
E 01	Av. Santos Dumont	Direito	714666.496	7092627.895
E 02	Av. Santos Dumont	Direito	714662.913	7092677.872
E 03	Av. Santos Dumont	Direito	714659.133	7092727.737
E 04	Av. Santos Dumont	Direito	714658.018	7092778.125
E 05	Av. Santos Dumont	Direito	714641.791	7092827.165
E 06	Av. Santos Dumont	Direito	714638.000	7092875.829
E 07	Av. Santos Dumont	Direito	714634.349	7092926.025
E 08	Av. Santos Dumont	Direito	714634.349	7092926.025
Ponto	Rua	Bordo	Coordenada X	Coordenada Y
E 09	Av. Santos Dumont	Direito	714625.659	7093025.431
E 10	Av. Santos Dumont	Direito	714621.805	7093075.238

Fonte: O autor (2020).

APÊNDICE B – RUA 01 - OTTO BOEHM



Fonte: O autor

APÊNDICE C – RUA 02 - SÃO BORJA

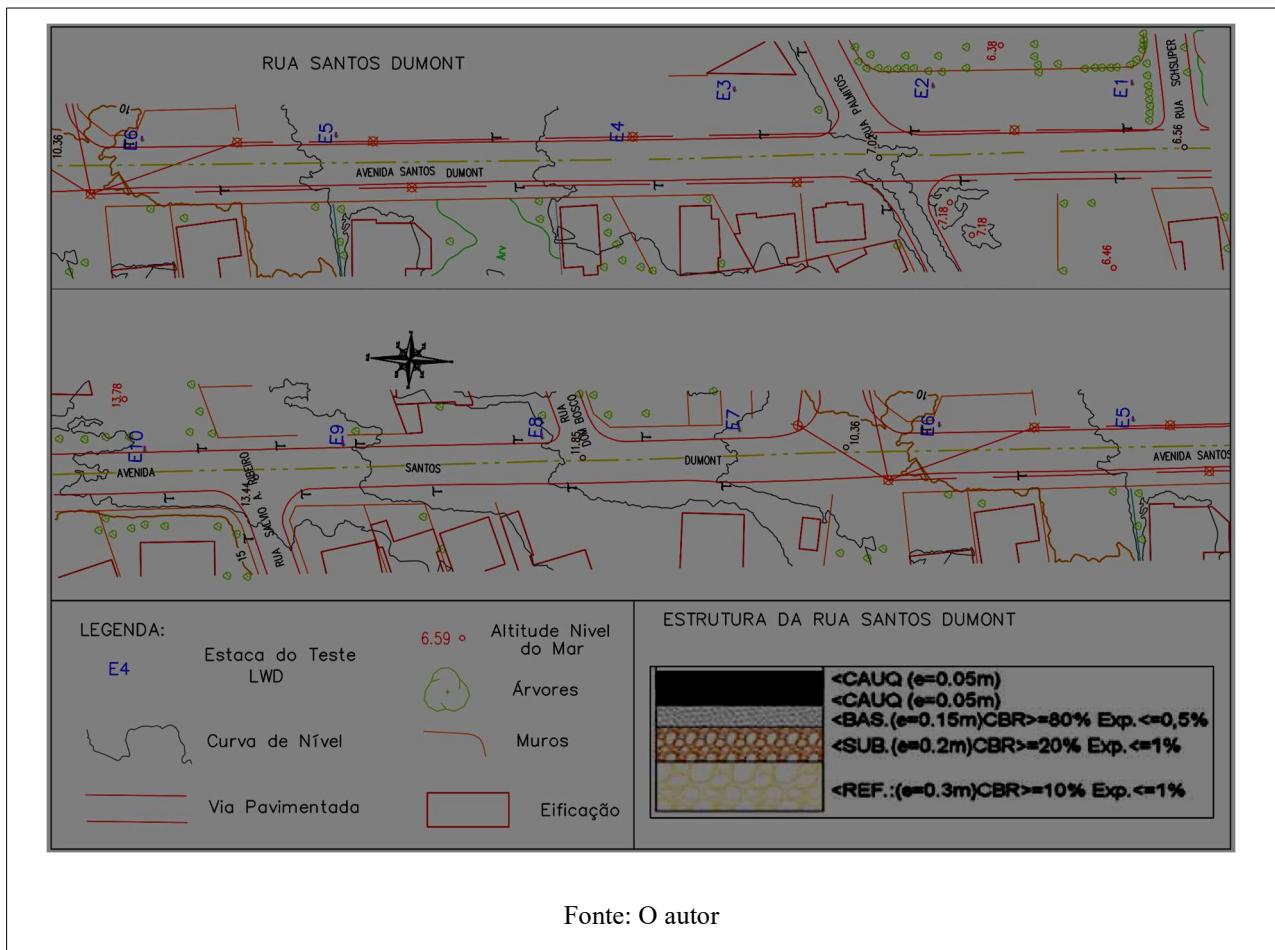


Fonte: O autor

APÊNDICE D – RUA 03 - PIRATUBA



APÊNDICE E – RUA 04 - AV. SANTOS DUMONT



APÊNDICE F – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO LWD

HMP Magdeburger Prüfgerätebau GmbH · Bülstringer Str. 6 · D-39126 Magdeburg

Calibration certificate No. 13-6271

for the light drop-weight tester according to engineering code for soil and rock testing in road construction TP BF-StB part 8.3

Customer:

Manufacturer: HMP
Magdeburger Prüfgerätebau GmbH
Bülstringer Str. 6
D-39126 Magdeburg

Type: HMP-LFG/pro
Device number: 6271
Loading mechanism: 6271
Device number: 6271
Settlement meas. device: 6271
Year of construction: 2013

Drop weight: 10kg
Impact force: 7070N +/-70N
Impact duration: 17ms +/-1,5ms
Fall height: 730mm

Test equipment: Load measuring device consist of
amplifier ML10 and compression force transducer C3H2/2t
Calibration label 1-420/D-K-15137-01-00/2013-10
Distance measuring device consist of
3 amplifiers ML55B and
3 induktiv distance sensors WA10
Calibration labels 00528,00529,00530/D-K-22501/2013-07

Air temperature: 20 °C

Person in charge: E.Budna

Test result: The light drop-weight tester meets the requirements
according to TP BF-StB part B 8.3 (2003).

Individual results at page 2 and 3

Number of pages of the certificate 3.

The extent of validity is 1 year, if no changes were made at the equipment.

Calibration laboratory: BASI- approved calibration laboratory for the light drop-weight tester at TP BF-StB part 8.3



Büstringer Str. 6, 39126 Magdeburg
+49(0)391 2514666 www.hmp-online.com

Date

03.03.2014

Dipl.-Ing. Leue

Head of the calibration laboratory

03.03.2014 page 1 of 3

13-6271

Fonte: Geoforma Engenharia.

APÊNDICE G - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO FWD

ROADRUNNER

 **FWD Calibration**

Date of Calibration: 09-Apr-2020

Calibration Center: Roadrunner Engenharia - Brazil
 Calibration Center Operator: Diego de Oliveira
 Signature Diego de Oliveira

FWD Owner: RoadRunner
 FWD Manufacturer: Dynatest
 FWD Model: 8002
 FWD Serial Number: 8002-956
 FWD Operator: Diego de Oliveira

Reference Load Cell: tmr003
 Reference Accelerometer: SN 26661
 WinFWDCal Software: Version 2.2.12

LOAD CELL CALIBRATION

Serial Number	Initial Gain	Reference Gains 1	Reference Gains 2	Average Gain	Final Gain
484	0.994	0.999	0.998	0.998	0.998

DEFLECTION SENSOR CALIBRATION

Serial Number	Initial Gain	Reference Gains				Relative Gains		Final Gain
		1	2	3	4	1	2	
8377	1.008	0.998	1.000	1.003	0.998	1.000	1.001	1.001
8002	1.022	1.017	1.015	1.017	1.016	1.018	1.019	1.018
738	1.000	1.000	0.997	1.001	0.998	0.997	0.999	0.998
8003	1.031	1.025	1.025	1.027	1.026	1.028	1.024	1.026
7097	1.022	1.020	1.016	1.020	1.018	1.018	1.018	1.018
737	1.004	1.004	0.999	1.003	1.002	1.003	1.002	1.002
3474	1.000	0.997	0.992	0.997	0.996	0.994	0.993	0.993

Messages:
Load Cell:
 All data checks passed

Sensor Reference Calibration:
 Reference Calibrations Accepted.
 Reference Trial Acceptance Criteria Met.

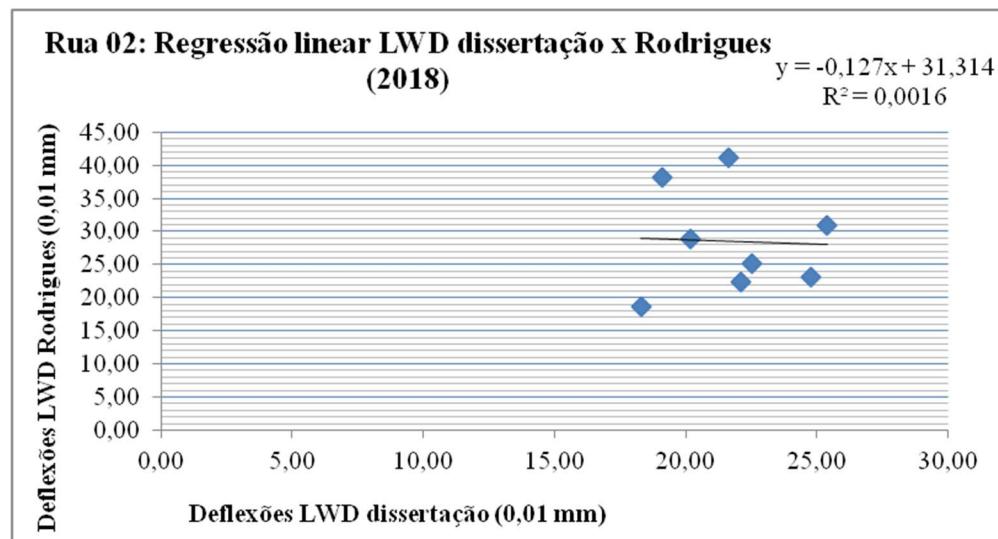
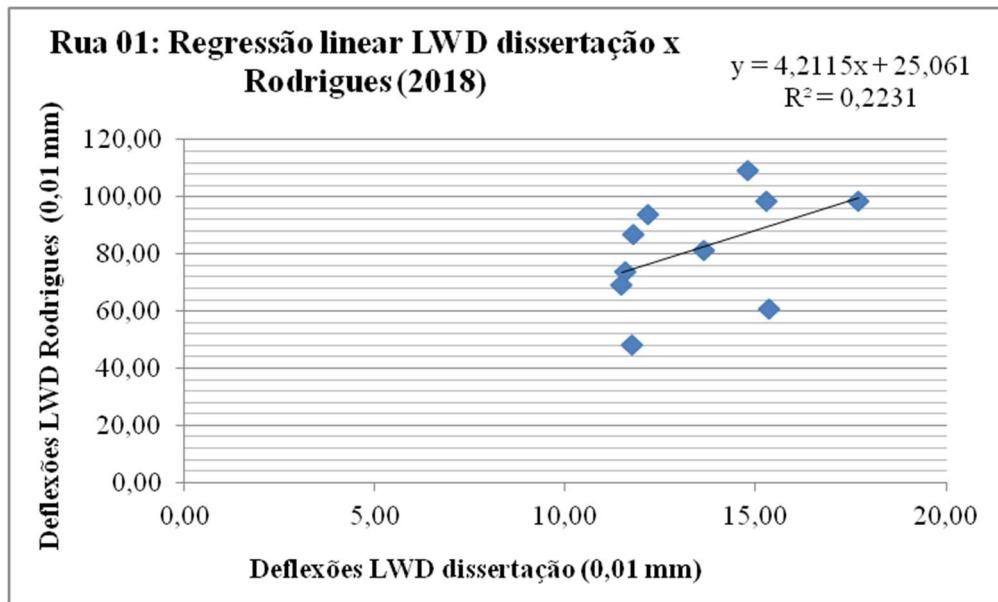
Sensor Relative Calibration:
 Sensor Calibration Completed!
 Final Acceptance Criteria are met for all sensors.

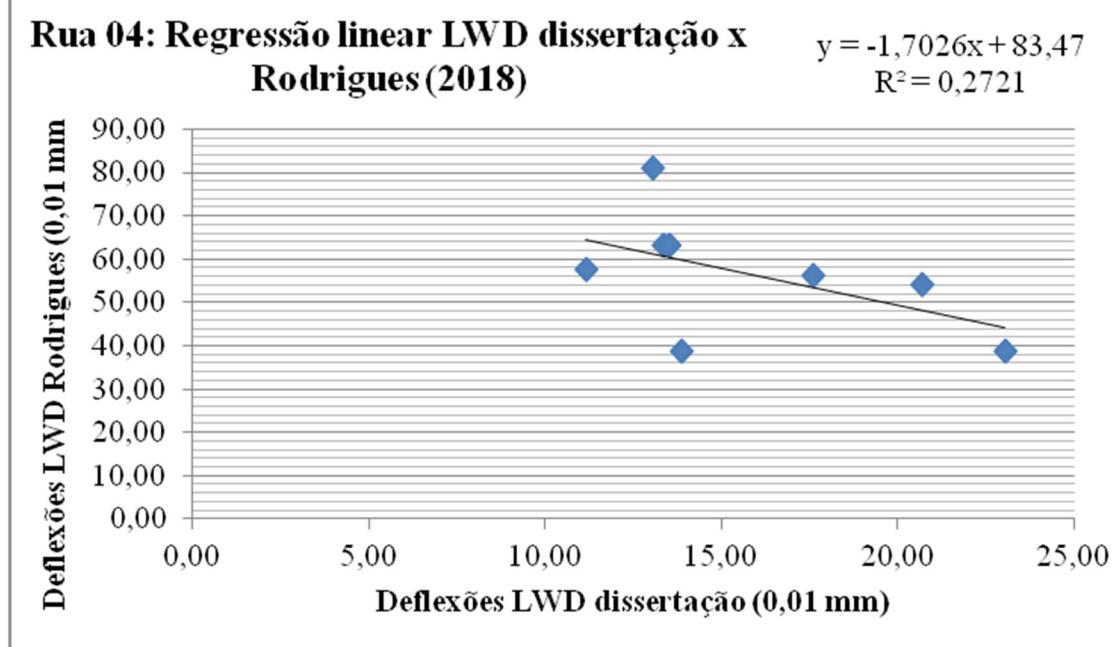
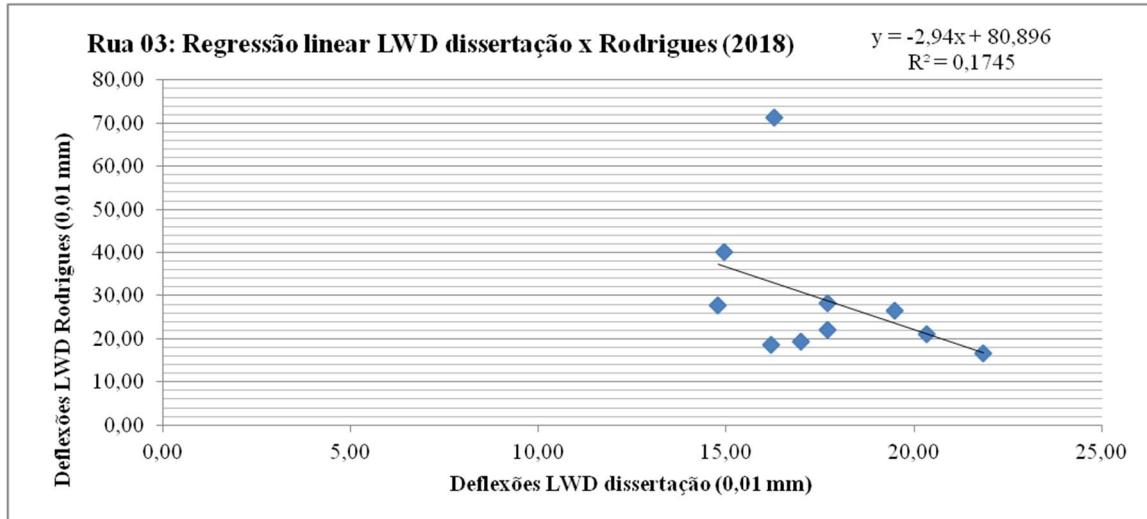
ROADRUNNER ENGENHARIA LTDA
www.rrunner.com.br



Fonte: RoadRunner Engenharia.

APÊNDICE H – REGRESSÃO LINEAR DAS MEDIDAS DEFLECTOMÉTRICAS DO LWD (DISSERTAÇÃO VERSUS RODRIGUES (2018))





Fonte: O autor.

APÊNDICE I - CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA DO FWD – POR RUA

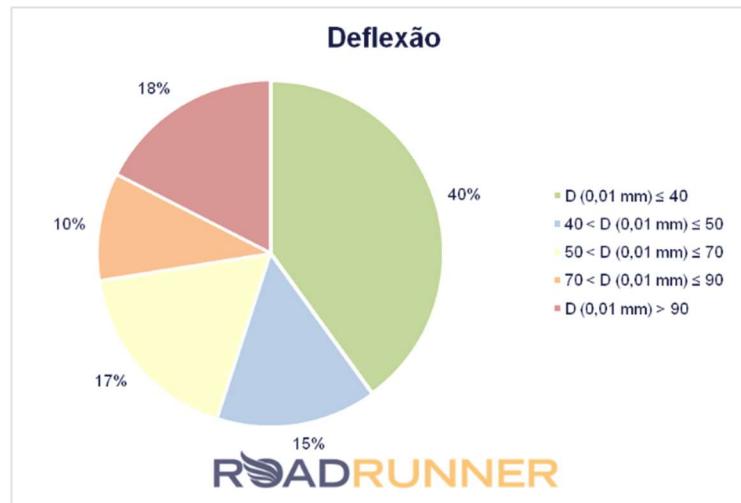
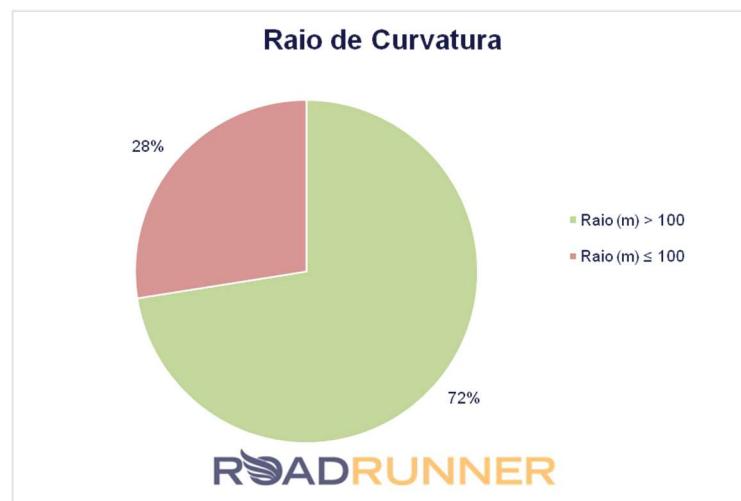
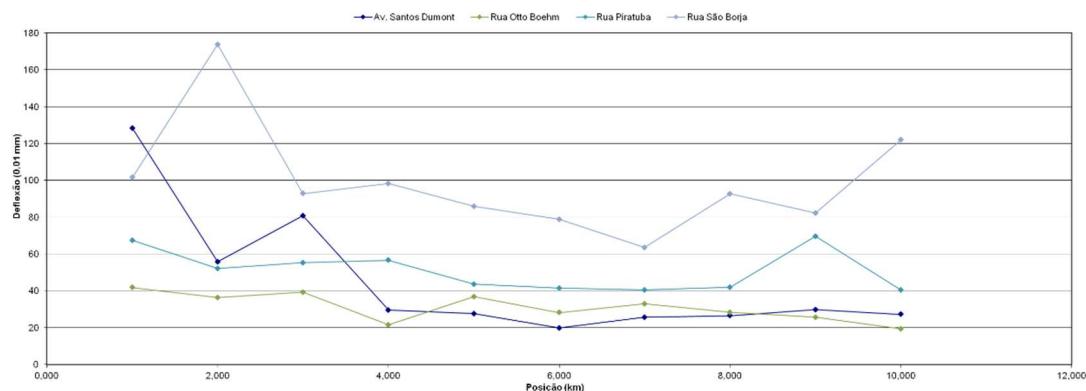
Local	Trecho	Pista	Sentido	Faixa	Hodômetro (km)	Raio de Aplicação (km)	Força (kN)	Carga (kgf)	Deflexões (0,01 mm)												Bacia	Temp. (°C)	Data	Hora	Informações GPS			Df1-Df4	Raio de Curvatura
									D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Ar	Pav.	Latitude	Longitude	Altitude									
Rua Otto Boehm	Ezebílio de Queiroz / Fernando de Noronha	Simples	Crescente	1	0,000	15 cm	40,04	4,086	41,8	30,6	22,8	16,5	12,7	8,8	6,5	24	24	16/06/20	22:19:00	-26,303535	-48,861017	1,8	25,3	207					
Rua Otto Boehm	Ezebílio de Queiroz / Fernando de Noronha	Simples	Crescente	1	0,050	15 cm	40,11	4,093	36,1	25,7	19,5	15,2	10,9	7,9	5,9	24	24	16/06/20	22:20:00	-26,303480	-48,860547	10,4	21,2	226					
Rua Otto Boehm	Ezebílio de Queiroz / Fernando de Noronha	Simples	Crescente	1	0,100	15 cm	39,97	4,079	39,2	29,6	22,3	16,2	11,9	8,0	5,9	24	24	16/06/20	22:21:00	-26,303394	-48,860057	2,3	23,0	236					
Rua Otto Boehm	Ezebílio de Queiroz / Fernando de Noronha	Simples	Crescente	1	0,150	15 cm	40,04	4,086	41,9	21,3	13,9	8,2	5,0	4,5	3,6	24	24	16/06/20	22:22:00	-26,303393	-48,860057	1,1	19,9	256					
Rua Otto Boehm	Ezebílio de Queiroz / Fernando de Noronha	Simples	Crescente	1	0,200	15 cm	40,11	4,093	35,9	24,4	20,9	14,6	10,2	7,4	5,8	24	24	16/06/20	22:22:00	-26,303222	-48,859569	1,2	22,3	244					
Rua Otto Boehm	Ezebílio de Queiroz / Fernando de Noronha	Simples	Crescente	1	0,250	15 cm	40,04	4,086	28,2	21,0	16,5	12,1	6,5	5,7	4,5	24	24	16/06/20	22:23:00	-26,303198	-48,858864	3,3	16,1	331					
Rua Otto Boehm	Ezebílio de Queiroz / Fernando de Noronha	Simples	Crescente	1	0,300	15 cm	40,11	4,093	33,0	23,9	18,4	13,8	9,3	6,6	4,8	24	24	16/06/20	22:24:00	-26,303038	-48,858078	2,2	16,1	264					
Rua Otto Boehm	Ezebílio de Queiroz / Fernando de Noronha	Simples	Crescente	1	0,350	15 cm	40,11	4,093	28,4	20,1	15,5	11,4	7,8	5,5	4,2	24	24	16/06/20	22:24:00	-26,302957	-48,857631	4,9	17,0	295					
Rua Otto Boehm	Ezebílio de Queiroz / Fernando de Noronha	Simples	Crescente	1	0,400	15 cm	40,32	4,114	25,7	16,2	12,8	8,4	6,1	4,5	3,7	24	24	16/06/20	22:25:00	-26,302823	-48,857125	13,2	17,3	275					
Rua Otto Boehm	Ezebílio de Queiroz / Fernando de Noronha	Simples	Crescente	1	0,450	15 cm	40,39	4,121	19,4	12,7	8,5	6,0	4,5	3,9	3,7	24	24	16/06/20	22:26:00	-26,302720	-48,856693	1,2	13,4	355					

Local	Trecho	Pista	Sentido	Faixa	Hodômetro (km)	Raio de Aplicação (km)	Força (kN)	Carga (kgf)	Deflexões (0,01 mm)												Bacia	Temp. (°C)	Data	Hora	Informações GPS			Df1-Df4	Raio de Curvatura
									D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Ar	Pav.	Latitude	Longitude	Altitude									
Rua São Bória		Simples	Crescente	1	0,000	15 cm	39,00	3,980	101,5	63,6	43,6	29,8	21,4	15,4	12,0	24	25	16/06/20	22:48:00	-26,306071	-48,810667	4,2	71,7	65					
Rua São Bória		Simples	Crescente	1	0,050	15 cm	36,99	3,775	173,8	111,3	73,3	46,0	29,5	20,2	14,5	24	25	16/06/20	22:49:00	-26,305700	-48,810859	6,3	127,8	38					
Rua São Bória		Simples	Crescente	1	0,100	15 cm	39,14	3,994	92,8	58,0	35,5	20,7	11,5	6,7	6,0	24	25	16/06/20	22:49:00	-26,305292	-48,811069	9,1	72,1	68					
Rua São Bória		Simples	Crescente	1	0,150	15 cm	39,00	3,980	98,3	61,0	37,5	20,1	12,2	7,5	6,3	24	25	16/06/20	22:50:00	-26,304876	-48,811284	13,4	78,2	64					
Rua São Bória		Simples	Crescente	1	0,200	15 cm	39,21	4,001	85,8	62,8	40,1	23,2	13,3	7,0	5,2	24	25	16/06/20	22:52:00	-26,304545	-48,811528	8,9	62,6	91					
Rua São Bória		Simples	Crescente	1	0,250	15 cm	39,45	4,017	78,1	47,3	26,1	13,5	8,4	5,1	5,0	24	25	16/06/20	22:53:00	-26,304283	-48,811741	2,2	65,4	74					
Rua São Bória		Simples	Crescente	1	0,300	15 cm	39,25	4,015	91,6	52,6	34,1	20,4	13,1	8,8	7,1	24	25	16/06/20	22:53:00	-26,303920	-48,812010	-0,3	46,0	171					
Rua São Bória		Simples	Crescente	1	0,350	15 cm	38,93	3,973	92,7	58,1	38,5	24,5	16,9	11,2	8,5	24	25	16/06/20	22:53:00	-26,303227	-48,812229	1,0	68,2	70					
Rua São Bória		Simples	Crescente	1	0,400	15 cm	39,07	3,987	82,3	53,2	34,7	22,4	15,9	12,2	9,2	24	25	16/06/20	22:54:00	-26,302832	-48,812431	0,1	59,8	81					
Rua São Bória		Simples	Crescente	1	0,450	15 cm	38,52	3,930	121,9	77,9	48,9	27,1	17,8	13,9	10,5	24	25	16/06/20	22:55:00	-26,302440	-48,812963	-0,8	94,8	53					

Local	Trecho	Pista	Sentido	Faixa	Hodômetro (km)	Raio de Aplicação (km)	Força (kN)	Carga (kgf)	Deflexões (0,01 mm)												Bacia	Temp. (°C)	Data	Hora	Informações GPS			Df1-Df4	Raio de Curvatura
									D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Ar	Pav.	Latitude	Longitude	Altitude									
Rua Pintuba	Faixa de Ônibus	Simples	Crescente	1	0,000	15 cm	36,42	4,022	67,4	52,5	42,8	32,1	22,6	13,7	9,2	24	24	16/06/20	23:15:00	-26,264432	-48,842295	4,9	35,3	158					
Rua Pintuba	Faixa de Ônibus	Simples	Crescente	1	0,050	15 cm	39,69	4,050	55,8	45,8	36,9	27,9	21,8	16,1	12,5	24	24	16/06/20	23:37:00	-26,264697	-48,850591	30,8	27,9	216					
Rua Pintuba	Faixa de Ônibus	Simples	Crescente	1	0,100	15 cm	39,49	4,029	80,8	56,3	39,5	26,9	20,9	14,5	11,2	24	24	16/06/20	23:37:00	-26,265033	-48,850593	33,5	53,9	95					
Rua Pintuba	Faixa de Ônibus	Simples	Crescente	1	0,150	15 cm	39,55	4,036	55,2	42,0	32,1	23,9	17,8	13,4	9,0	24	24	16/06/20	23:37:00	-26,265202	-48,850593	3,1	34,1	344					
Rua Pintuba	Faixa de Ônibus	Simples	Crescente	1	0,200	15 cm	39,76	4,057	43,6	34,4	27,8	22,1	16,8	12,2	9,5	24	24	16/06/20	23:39:00	-26,267784	-48,850577	38,9	1,9	595					
Rua Pintuba	Faixa de Ônibus	Simples	Crescente	1	0,250	15 cm	40,32	4,114	19,8	16,7	14,7	12,2	9,7	7,1	5,2	24	25	16/06/20	23:41:00	-26,265920	-48,850560	26,6	7,6	762					
Rua Pintuba	Rua Lateral	Simples	Crescente	1	0,300	15 cm	40,04	4,086	25,6	21,9	19,0	15,7	12,5	8,8	6,7	24	24	16/06/20	23:42:00	-26,268745	-48,850527	17,7	9,9	607					
Rua Pintuba	Rua Lateral	Simples	Crescente	1	0,350	15 cm	40,22	4,107	26,5	21,2	18,7	15,6	12,4	9,3	7,4	24	24	16/06/20	23:43:00	-26,269187	-48,850578	16,7	10,9	477					
Rua Pintuba	Rua Lateral	Simples	Crescente	1	0,400	15 cm	40,11	4,093	29,8	24,7	21,0	17,4	13,7	10,3	7,6	24	24	16/06/20	23:44:00	-26,269638	-48,850517	3,1	12,4	450					
Rua Pintuba	Rua Lateral	Simples	Crescente	1	0,450	15 cm	39,97	4,079	27,2	22,8	20,2	16,9	13,4	9,6	7,3	24	24	16/06/20	23:45:00	-26,270087	-48,850470	8,4	10,3	548					

Fonte: O autor.

APÊNDICE J - CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTICA DO FWD – DEFLEXÃO E RAIO DE CURVATURA



Fonte: RoadRunner Engenharia.

APÊNDICE K – RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD/RUA01

APÊNDICE N - RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD Rua 01 - Módulos de elasticidade equivalentes retroanalisados através do software BackMeDiNa a partir das deflexões medidas com o equipamento FWD

Estaca: 1 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA	0
CARGA(kgf) :	4086	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C)	24			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLX MEDIDA(um)	418	306	228	165	127	86
DEFLX CALCULADA(um)	450	314	241	173	130	80
ERRO(um) :	0,072					
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		
1 - Camadas Asfálticas	5	8072	0,3	NÃO ADERIDO		
2 - Camadas Granulares	15	662	0,4	NÃO ADERIDO		
3 - Camadas Granulares	30	497	0,4	NÃO ADERIDO		
4 - Subleito	0	162	0,45	-		
Estaca: 2 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA	0
CARGA(kgf) :	4093	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C)	24			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLX MEDIDA(um)	364	257	195	152	109	79
DEFLX CALCULADA(um)	374	264	207	154	119	76
ERRO(um) :	0,061					
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		
1 - Camadas Asfálticas	5	8438	0,3	NÃO ADERIDO		
2 - Camadas Granulares	15	825	0,4	NÃO ADERIDO		
3 - Camadas Granulares	30	750	0,4	NÃO ADERIDO		
4 - Subleito	0	175	0,45	-		
Estaca: 3 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA	0
CARGA(kgf) :	4079	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C)	24			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLX MEDIDA(um)	392	296	223	162	119	80
DEFLX CALCULADA(um)	458	311	237	168	125	76
ERRO(um) :	0,085					
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		
1 - Camadas Asfálticas	5	5000	0,3	NÃO ADERIDO		
2 - Camadas Granulares	15	750	0,4	NÃO ADERIDO		
3 - Camadas Granulares	30	450	0,4	NÃO ADERIDO		
4 - Subleito	0	169	0,45	-		
Estaca: 4 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA	0
CARGA(kgf) :	4107	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C)	24			

Fonte: O autor.

APÊNDICE L – RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD/RUA02

APÊNDICE O - RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD Rua 02 - Módulos de elasticidade equivalentes retroanalisados através do software BackMeDiNa a partir das deflexões medidas com o equipamento FWD

Estaca: 1 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	3980	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	25			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLEX MEDIDA(um)	1015	636	438	298	214	154
DEFLEX CALCULADA(um)	1037	636	433	286	223	150
ERRO(um) :	0,05					
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		
1 - Camadas Asfálticas	5	3938	0,3	NÃO ADERIDO		
2 - Camadas Granulares	15	89	0,4	NÃO ADERIDO		
3 - Camadas Granulares	38	338	0,4	NÃO ADERIDO		
4 - Subleito	0	88	0,45	-		
Estaca: 2 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	3775	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	25			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLEX MEDIDA(um)	1738	1113	733	460	295	202
DEFLEX CALCULADA(um)	1642	1074	738	446	312	197
ERRO(um) :	0,04					
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		
1 - Camadas Asfálticas	5	3938	0,3	NÃO ADERIDO		
2 - Camadas Granulares	15	39	0,4	NÃO ADERIDO		
3 - Camadas Granulares	38	148	0,4	NÃO ADERIDO		
4 - Subleito	0	62	0,45	-		
Estaca: 3 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	3994	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	25			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLEX MEDIDA(um)	928	580	355	207	115	67
DEFLEX CALCULADA(um)	930	569	370	206	129	71
ERRO(um) :	0,084					
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		
1 - Camadas Asfálticas	5	4156	0,3	NÃO ADERIDO		
2 - Camadas Granulares	15	180	0,4	NÃO ADERIDO		
3 - Camadas Granulares	38	125	0,4	NÃO ADERIDO		
4 - Subleito	0	169	0,45	-		
Estaca: 4 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	3980	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	25			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLEX MEDIDA(um)	983	610	375	201	122	75
DEFLEX CALCULADA(um)	947	573	373	213	141	81
ERRO(um) :	0,084					
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		
1 - Camadas Asfálticas	5	4000	0,3	NÃO ADERIDO		
2 - Camadas Granulares	15	150	0,4	NÃO ADERIDO		
3 - Camadas Granulares	38	150	0,4	NÃO ADERIDO		

Fonte: O autor.

APÊNDICE M – RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD/RUA03

APÊNDICE P - RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD

Rua 03 - Módulos de elasticidade equivalentes retroanalisados através do software
BackMeDiNa a partir das deflexões medidas com o equipamento FWD

Estaca: 1 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	4022	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	24			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLX MEDIDA(um)	674	525	428	321	226	137
DEFLX CALCULADA(um)	675	529	431	313	230	138
ERRO(um) :		0,022				
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		
1 - Camadas Asfálticas	3,5	4238	0,3	ADERIDO		
2 - Camadas Asfálticas	7	2888	0,3	NÃO ADERIDO		
3 - Camadas Estabilizadas	20	296	0,2	NÃO ADERIDO		
4 - Subleito	0	90	0,45	-		
Estaca: 2 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	4057	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	24			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLX MEDIDA(um)	522	413	331	252	182	110
DEFLX CALCULADA(um)	523	413	340	250	186	112
ERRO(um) :		0,018				
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		
1 - Camadas Asfálticas	3,5	4800	0,3	ADERIDO		
2 - Camadas Asfálticas	7	4125	0,3	NÃO ADERIDO		
3 - Camadas Estabilizadas	20	450	0,2	NÃO ADERIDO		
4 - Subleito	0	113	0,45	-		
Estaca: 3 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	4036	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	24			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLX MEDIDA(um)	552	420	321	239	178	134
DEFLX CALCULADA(um)	520	411	338	249	185	111
ERRO(um) :		0,09				
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		
1 - Camadas Asfálticas	3,5	4800	0,3	ADERIDO		
2 - Camadas Asfálticas	7	4125	0,3	NÃO ADERIDO		
3 - Camadas Estabilizadas	20	450	0,2	NÃO ADERIDO		
4 - Subleito	0	113	0,45	-		
Estaca: 4 + 0m		FAIXA:	0		TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	4036	RAIO(cm) :	15			
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	24			
SENSOR	0	1	2	3	4	5
DIST(cm) :	0	20	30	45	60	90
DEFLX MEDIDA(um)	566	453	358	281	216	157
DEFLX CALCULADA(um)	571	472	404	315	245	155
ERRO(um) :		0,094				
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE		

Fonte: O autor.

APÊNDICE N – RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD/RUA04

APÊNDICE Q - RETROANÁLISE DAS DEFLEXÕES MEDIDAS COM FWD

Rua 04 - Módulos de elasticidade equivalentes retroanalisados através do software BackMeDiNa a partir das deflexões medidas com o equipamento FWD

Estaca: 1 + 0m		FAIXA:	0	TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	3958	RAIO(cm) :	15		
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	24		
SENSOR	0 1 2	3 4 5	6		
DIST(cm) :	0 20 30	45 60 90	120		
DEFLX MEDIDA(um)	1283 990 699	417 268 161	129		
DEFLX CALCULADA(um)	1181 875 671	442 299 161	107		
ERRO(um) :	0,097				
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE	
1 - Camadas Asfálticas	5	2900	0,3	ADERIDO	
2 - Camadas Asfálticas	5	1250	0,3	NÃO ADERIDO	
3 - Camadas Granulares	15	63	0,4	NÃO ADERIDO	
4 - Camadas Granulares	50	84	0,4	NÃO ADERIDO	
5 - Subleito	0	84	0,45	-	
Estaca: 2 + 0m		FAIXA:	0	TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	4050	RAIO(cm) :	15		
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	24		
SENSOR	0 1 2	3 4 5	6		
DIST(cm) :	0 20 30	45 60 90	120		
DEFLX MEDIDA(um)	558 458 369	279 218 161	125		
DEFLX CALCULADA(um)	582 467 389	296 230 149	105		
ERRO(um) :	0,078				
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE	
1 - Camadas Asfálticas	5	4500	0,3	ADERIDO	
2 - Camadas Asfálticas	5	4500	0,3	NÃO ADERIDO	
3 - Camadas Granulares	15	394	0,4	NÃO ADERIDO	
4 - Camadas Granulares	50	189	0,4	NÃO ADERIDO	
5 - Subleito	0	95	0,45	-	
Estaca: 3 + 0m		FAIXA:	0	TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	4029	RAIO(cm) :	15		
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	24		
SENSOR	0 1 2	3 4 5	6		
DIST(cm) :	0 20 30	45 60 90	120		
DEFLX MEDIDA(um)	808 563 395	269 201 145	112		
DEFLX CALCULADA(um)	763 549 420	289 213 135	95		
ERRO(um) :	0,079				
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE	
1 - Camadas Asfálticas	5	3100	0,3	ADERIDO	
2 - Camadas Asfálticas	5	1500	0,3	NÃO ADERIDO	
3 - Camadas Granulares	15	150	0,4	NÃO ADERIDO	
4 - Camadas Granulares	50	189	0,4	NÃO ADERIDO	
5 - Subleito	0	102	0,45	-	
Estaca: 4 + 0m		FAIXA:	0	TRILHA:	0
CARGA(kgf) :	4093	RAIO(cm) :	15		
TEMP AR(C) :	24	TEMP PAV(C) :	24		
SENSOR	0 1 2	3 4 5	6		
DIST(cm) :	0 20 30	45 60 90	120		
DEFLX MEDIDA(um)	295 252 221	184 144 100	72		
DEFLX CALCULADA(um)	328 255 212	168 140 104	79		
ERRO(um) :	0,067				
ESTRUTURA	ESPESSURA(cm)	MR(MPa)	COEF POISSON	INTERFACE	

Fonte: O autor.

APÊNDICE O: DIMENSIONAMENTO DE ESPESSURAS DE REFORÇO PELO MÉTODO MEDINA – RUA 1 (OTTO BOHEM)

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para giovani devitte (giovanidevitte09@gmail.com), da empresa devapav..

Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa: **devapav**

Nome do Projeto: **Otto Bohem**

Responsável pelo projeto: **giovani devitte**

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

Tipo de via: **Sistema Coletor Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **20/06/2021 às 01:13:55** no modo: **Projeto de Reforço**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **17,1%**

Análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada.

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso. Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO Classe 1	5,0	Resiliente Linear MR = 5764 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	Removida por fresagem	Resiliente Linear MR = 8258 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	15,0	Resiliente Linear MR = 698 MPa	0,40
4	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	30,0	Resiliente Linear MR = 2159 MPa	0,40
5	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 235 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = ... Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Norma ou Especificação = DNIT ES 31 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.	Ensaio de Fadiga -Modelo: k1 .(et ^ k2) -Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 5,496e-11 -Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,253 -Classe de Fadiga: ≥ 1 -FFM (100μ a 250μ): ≥ 0,84 Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 209 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 575 ciclos

2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

Propriedades	Modelos
Espessura de fresagem (cm) = 5,0	
Espessura de campo (cm) = 5,0	
Área Trincada (%) = 10	
IRI (m/km) = 2	
Deflexão característica (0,01mm) = 38	
Idade do pavimento (anos) = ...	
Módulo mínimo (MPa) = 5000	
Módulo máximo (MPa) = 9970	
MR - Desvio Padrão (MPa) = 1477	
Coef de Variação do Módulo (%) = 17,9	
Comentários = ...	

3 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
Módulo mínimo (MPa) = 500	
Módulo máximo (MPa) = 963	
MR - Desvio Padrão (MPa) = 139	
Coef de Variação do Módulo (%) = 20,0	
Comentários = ...	

4 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
Módulo mínimo (MPa) = 450	
Módulo máximo (MPa) = 8320	
MR - Desvio Padrão (MPa) = 2881	
Coef de Variação do Módulo (%) = 133,4	
Comentários = ...	

5 - SUBLEITO: Subleito

Propriedades	Modelos
Módulo mínimo (MPa) = 162	
Módulo máximo (MPa) = 336	
MR - Desvio Padrão (MPa) = 63	
Coef de Variação do Módulo (%) = 26,9	
Comentários = ...	

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1370**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passageiros anual do eixo padrão (1º ano): **5,00e+05**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passageiros anual do eixo padrão na faixa de projeto: **5,00e+05**

Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**

Número Equivalente total de passageiros do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **5,00e+06**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	4,167e+04	1,08%
6	2,500e+05	2,12%
12	5,000e+05	2,88%
18	7,500e+05	3,53%
24	1,000e+06	4,15%
30	1,250e+06	4,76%
36	1,500e+06	5,37%
42	1,750e+06	6,01%
48	2,000e+06	6,66%
54	2,250e+06	7,34%
60	2,500e+06	8,04%
66	2,750e+06	8,78%
72	3,000e+06	9,55%
78	3,250e+06	10,36%
84	3,500e+06	11,20%
90	3,750e+06	12,09%
96	4,000e+06	13,01%
102	4,250e+06	13,98%
108	4,500e+06	14,98%
114	4,750e+06	16,03%
120	5,000e+06	17,12%

Controle por Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - Classe 1

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman									
Raio = 10,8 cm	22	17	15	12	11	8	6	5	4
Carga = 8,2 ton									
FWD									
Raio = 15,0 cm	27	17	13	10	8	6	4	3	2
Carga = 4,0 ton									

APÊNDICE P: DIMENSIONAMENTO DE ESPESSURAS DE REFORÇO PELO MÉTODO MEDINA – RUA 2 (SÃO BORJA)

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para giovani devitte (giovanidevitte09@gmail.com), da empresa devapav..

Análise do reforço do pavimento

Empresa: **devapav**

Nome do Projeto: **Rua São Borja**

Responsável pelo projeto: **giovani devitte**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **20/06/2021 às 01:19:14** no modo: **Projeto de Reforço**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **31,7%**.

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento do reforço do pavimento!

- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

ATENÇÃO:

A análise não considera a reflexão de trincas do pavimento existente!

Dados da estrutura existente para auxiliar o projetista:

- Área Trincada: 25,0%

- Condição de tráfego: **REGULAR** (IRI = 3,0 m/km)

- Deflexão característica: **dc = 134,0 (0,01mm)**

- Camada de base: Considerar a adoção de medidas para reconstrução ou reciclagem

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO Classe 1	15,0	Resiliente Linear MR = 5764 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	4,6	Resiliente Linear MR = 4214 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	15,0	Resiliente Linear MR = 117 MPa	0,40
4	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	38,0	Resiliente Linear MR = 354 MPa	0,40
5	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 133 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades	Modelos
<p>Tipo de CAP = ...</p> <p>Massa específica (g/cm³) = 2,4</p> <p>Norma ou Especificação = DNIT ES 31</p> <p>Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.</p>	<p>Ensaio de Fadiga</p> <p>-Modelo: $k1 \cdot (et^k2)$</p> <p>-Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,496e-11$</p> <p>-Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,253$</p> <p>-Classe de Fadiga: ≥ 1</p> <p>-FFM (100μ a 250μ): $\geq 0,84$</p> <p>Flow Number Mínimo</p> <p>- Condição de Tráfego Normal: ≥ 265 ciclos</p> <p>- Condição de Tráfego Severa: ≥ 718 ciclos</p>

2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

Propriedades	Modelos
<p>Espessura de fresagem (cm) = 0,4</p> <p>Espessura de campo (cm) = 5,0</p> <p>Área Trincada (%) = 25,0</p> <p>IRI (m/km) = 3,0</p> <p>Deflexão característica (0,01mm) = 134</p> <p>Idade do pavimento (anos) =</p> <p>Módulo mínimo (MPa) = 3938</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 4755</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 278</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 6,6</p> <p>Comentários = ...</p>	

3 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
<p>Módulo mínimo (MPa) = 33</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 235</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 70</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 59,7</p> <p>Comentários = ...</p>	

4 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
<p>Módulo mínimo (MPa) = 125</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 900</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 262</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 74,1</p> <p>Comentários = ...</p>	

5 - SUBLEITO: Subleito

Propriedades	Modelos
<p>Módulo mínimo (MPa) = 62</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 206</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 46</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 34,5</p> <p>Comentários = ...</p>	

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **2347**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passageiros anual do eixo padrão (1º ano): **8,57e+05**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passageiros anual do eixo padrão na faixa de projeto: **8,57e+05**

Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**

Número Equivalente total de passageiros do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **8,57e+06**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	7,139e+04	1,27%
6	4,283e+05	2,56%
12	8,567e+05	3,59%
18	1,285e+06	4,54%
24	1,713e+06	5,50%
30	2,142e+06	6,49%
36	2,570e+06	7,54%
42	2,998e+06	8,66%
48	3,427e+06	9,86%
54	3,855e+06	11,15%
60	4,283e+06	12,53%
66	4,712e+06	14,01%
72	5,140e+06	15,58%
78	5,568e+06	17,26%
84	5,997e+06	19,04%
90	6,425e+06	20,92%
96	6,853e+06	22,90%
102	7,282e+06	24,97%
108	7,710e+06	27,13%
114	8,138e+06	29,38%
120	8,567e+06	31,71%

Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - Classe 1

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	37	33	30	25	21	15	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	35	30	26	21	17	11	8	6	4

APÊNDICE Q: DIMENSIONAMENTO DE ESPESSURAS DE REFORÇO PELO MÉTODO MEDINA – RUA 3 (PIRATUBA)

Programa MeDiNa v.1.15.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para giovani devitte (giovanidevitte09@gmail.com), da empresa devapav..

Análise do reforço do pavimento

Empresa: **devapav**

Nome do Projeto: **Piratuba**

Responsável pelo projeto: **giovani devitte**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **20/06/2021 às 01:24:24** no modo: **Projeto de Reforço**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **23,3%**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento do reforço do pavimento!

ATENÇÃO:

A análise não considera a reflexão de trincas do pavimento existente!

Dados da estrutura existente para auxiliar o projetista:

- Área Trincada: 10,0%
- Condição de tráfego: BOA (IRI = 2,0 m/km)
- Deflexão característica: dc = 62,0 (0,01mm)

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a **responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista**, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO Classe 1	10,5	Resiliente Linear MR = 5764 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	Removida por fresagem	Resiliente Linear MR = 7092 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	20,0	Resiliente Linear MR = 599 MPa	0,38
4	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 111 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades

Modelos

Propriedades	Modelos
<p>Tipo de CAP = ...</p> <p>Massa específica (g/cm³) = 2,4</p> <p>Norma ou Especificação = DNIT ES 31</p> <p>Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.</p>	<p>Ensaio de Fadiga</p> <p>-Modelo: k1 .(et ^ k2)</p> <p>-Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 5,496e-11</p> <p>-Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,253</p> <p>-Classe de Fadiga: ≥ 1</p> <p>-FFM (100μ a 250μ): ≥ 0,84</p> <p>Flow Number Mínimo</p> <p>- Condição de Tráfego Normal: ≥ 209 ciclos</p> <p>- Condição de Tráfego Severa: ≥ 575 ciclos</p>

2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

Propriedades	Modelos
<p>Espessura de fresagem (cm) = 3,5</p> <p>Espessura de campo (cm) = 3,5</p> <p>Área Trincada (%) = 10</p> <p>IRI (m/km) = 2,0</p> <p>Deflexão característica (0,01mm) = 62</p> <p>Idade do pavimento (anos) = ...</p> <p>Módulo mínimo (MPa) = 4238</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 9113</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 1533</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 21,6</p> <p>Comentários = ...</p>	

3 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
<p>Módulo mínimo (MPa) = 132</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 890</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 251</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 41,9</p> <p>Comentários = ...</p>	

4 - SUBLEITO: Subleito

Propriedades	Modelos
<p>Módulo mínimo (MPa) = 90</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 144</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 15</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 13,5</p> <p>Comentários = ...</p>	

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1370**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passageiros anual do eixo padrão (1º ano): **5,00e+05**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passageiros anual do eixo padrão na faixa de projeto: **5,00e+05**

Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**

Número Equivalente total de passageiros do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **5,00e+06**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	4,167e+04	1,17%
6	2,500e+05	2,34%
12	5,001e+05	3,22%
18	7,501e+05	4,01%
24	1,000e+06	4,77%
30	1,250e+06	5,55%
36	1,500e+06	6,35%
42	1,750e+06	7,19%
48	2,000e+06	8,07%
54	2,250e+06	9,00%
60	2,500e+06	9,99%
66	2,750e+06	11,04%
72	3,000e+06	12,14%
78	3,250e+06	13,31%
84	3,500e+06	14,54%
90	3,750e+06	15,84%
96	4,000e+06	17,21%
102	4,250e+06	18,64%
108	4,500e+06	20,14%
114	4,750e+06	21,70%
120	5,001e+06	23,33%

Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - Classe 1

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	47	40	36	29	23	16	12	10	9
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	46	38	32	24	19	12	8	6	5

APÊNDICE R: DIMENSIONAMENTO DE ESPESSURAS DE REFORÇO PELO MÉTODO MEDINA — RUA 4 (AV. SANTOS DUMONT)

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para giovani devitte (giovanidevitte09@gmail.com), da empresa devapav..

Análise do reforço do pavimento

Empresa: **devapav**

Nome do Projeto: **Av. Santos Dumont**

Responsável pelo projeto: **giovani devitte**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **20/06/2021 às 01:25:15** no modo: **Projeto de Reforço**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **55,2%**.

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento do reforço do pavimento!

- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

ATENÇÃO:

A análise não considera a reflexão de trincas do pavimento existente!

Dados da estrutura existente para auxiliar o projetista:

- Área Trincada: **10,0%**

- Condição de tráfego: **BOA (IRI = 2,0 m/km)**

- Deflexão característica: **dc = 80,0 (0,01mm)**

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO Classe 1	15,0	Resiliente Linear MR = 5764 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	5,0	Resiliente Linear MR = 5535 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada Asfáltica	5,0	Resiliente Linear MR = 5210 MPa	0,30
4	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	15,0	Resiliente Linear MR = 502 MPa	0,40
5	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	50,0	Resiliente Linear MR = 580 MPa	0,40
6	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 133 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades	Modelos
<p>Tipo de CAP = ...</p> <p>Massa específica (g/cm³) = 2,4</p> <p>Norma ou Especificação = DNIT ES 31</p> <p>Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.</p>	<p>Ensaio de Fadiga</p> <p>-Modelo: k1 .(et ^ k2)</p> <p>-Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 5,496e-11</p> <p>-Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,253</p> <p>-Classe de Fadiga: ≥ 1</p> <p>-FFM (100μ a 250μ): ≥ 0,84</p> <p>Flow Number Mínimo</p> <p>- Condição de Tráfego Normal: ≥ 383 ciclos</p> <p>- Condição de Tráfego Severa: ≥ 1019 ciclos</p>

2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

Propriedades	Modelos
<p>Espessura de fresagem (cm) = 0,0</p> <p>Espessura de campo (cm) = 5,0</p> <p>Área Trincada (%) = 10</p> <p>IRI (m/km) = 2,0</p> <p>Deflexão característica (0,01mm) = 80</p> <p>Idade do pavimento (anos) =</p> <p>Módulo mínimo (MPa) = 2900</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 7300</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 1522</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 27,5</p> <p>Comentários = ...</p>	

3 - CAMADA EXISTENTE: Camada Asfáltica

Propriedades	Modelos
<p>Módulo mínimo (MPa) = 1250</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 7300</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 2149</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 41,3</p> <p>Comentários = ...</p>	

4 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
<p>Módulo mínimo (MPa) = 63</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 887</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 253</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 50,5</p> <p>Comentários = ...</p>	

5 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
<p>Módulo mínimo (MPa) = 84</p> <p>Módulo máximo (MPa) = 985</p> <p>MR - Desvio Padrão (MPa) = 316</p> <p>Coef de Variação do Módulo (%) = 54,5</p> <p>Comentários = ...</p>	

6 - SUBLEITO: Subleito

Propriedades	Modelos
Módulo mínimo (MPa) = 84	
Módulo máximo (MPa) = 210	
MR - Desvio Padrão (MPa) = 35	
Coef de Variação do Módulo (%) = 26,6	
Comentários = ...	

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **5479**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passageiros anual do eixo padrão (1º ano): **2,00e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passageiros anual do eixo padrão na faixa de projeto: **2,00e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**

Número Equivalente total de passageiros do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **2,00e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	1,667e+05	1,45%
6	1,000e+06	3,05%
12	2,000e+06	4,45%
18	3,000e+06	5,85%
24	4,000e+06	7,34%
30	5,000e+06	8,97%
36	6,000e+06	10,78%
42	7,000e+06	12,78%
48	8,000e+06	14,99%
54	9,000e+06	17,40%
60	1,000e+07	20,03%
66	1,100e+07	22,87%
72	1,200e+07	25,92%
78	1,300e+07	29,15%
84	1,400e+07	32,55%
90	1,500e+07	36,10%
96	1,600e+07	39,77%
102	1,700e+07	43,54%
108	1,800e+07	47,39%
114	1,900e+07	51,27%
120	2,000e+07	55,16%

Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - Classe 1

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	29	26	24	21	19	14	12	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	26	22	20	17	14	10	8	6	5

ANEXO A – NÚMERO “N” – RUA 01 E 03 – RUA OTTO BOHEM E PIRATUBA

• Base

Se aplica à execução de bases granulares, constituídas de camadas de solos, misturas de solos e materiais britados, ou produtos totais de britagem. As bases constituídas de solo e materiais britado são comumente designadas de “solo-brita”, e as constituídas exclusivamente de produto de britagem, bases de brita graduada. A base será executada com materiais que preencham os seguintes requisitos:

a) Deverão possuir composição granulométrica enquadrada em uma das faixas da tabela abaixo:

PENEIRAS	mm	FAIXAS			
		A	B	C	D
2"	50,80	100	100	-	-
1"	25,40	-	-	100	100
3/8"	9,50	30 – 65	40 – 75	50 – 85	60 – 100
n. 4	4,80	25 – 55	30 – 60	35 – 65	50 – 85
n. 10	2,00	15 – 40	20 – 45	25 – 50	40 – 70
n. 40	0,42	8 – 20	15 – 30	15 – 30	25 – 45
n. 200	0,074	2 - 5	5 - 15	5 - 15	10 - 25

b) A fração que passa na peneira N.º 40 deverá apresentar limite inferior ou igual a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%; quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deverá ser maior que 30%;

c) A porcentagem do material que passa na peneira N.º 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira N.º 40;

d) O Índice de Suporte Califórnia não deverá ser inferior a 60% e a expansão máxima será de 0,5%, determinadas segundo o método do DNER-ME 49-64 e com a energia do método DNER-ME48-64.

Para rodovias em que o tráfego previsto para o período de projeto ultrapassar o valor $N = 5 \times 10^5$, o Índice de Suporte Califórnia do material da camada de base não deverá ser inferior a 80%, neste caso.

Fonte: Azimute Engenharia.

ANEXO B – NÚMERO “N” – RUA 02 – RUA SÃO BORJA

PLANE S.A. Estudos e Projetos de Engenharia	Nº CLIENTE: I-OAESV-R-R0/16-30-Iv	REV. CLIENTE: 3	FOLHA: 153/212
	Nº PLANE/E: RL-F01-A05-0001	REV. PLANE/E: C	

em que:

Equação 6 – Fator de veículo.

$$FV_i = \sum_{j=1}^{j=m} FC_j$$

onde:

j : tipo de eixo, variando de 1 a m ;

m : número de eixos do veículo i ;

FC_j : fator de equivalência de carga correspondente ao eixo j do veículo i .

Tabela 78 - Percentuais de veículos comerciais na faixa de projeto.

Número de faixas de Tráfego da rodovia	Percentual de veículos comerciais na faixa de projeto (c)
2 (pista simples)	50 %
4 (pista dupla)	35 a 48 %
6 ou mais (pista dupla)	25 a 48 %

Fonte – DNIT, 2006.

Os cálculos do N pelo método do USACE, para os dois sentidos da Ponte Joinville e sistema viário associado, são apresentados nas Tabelas Tabela 79 e Tabela 80.

O N no sentido Sul – Norte, para um período de projeto de 12 anos, foi de $8,50 \times 10^6$ solicitações, e no sentido Norte – Sul o valor obtido foi de $8,57 \times 10^6$ solicitações.

Os valores obtidos para o N são referentes a vias de tráfego pesado.

Fonte: Prefeitura de Joinville.

ANEXO C – NÚMERO. “N” E TIPO DE SOLO DO SUBLITO – RUA 04 - AV. SANTOS DUMONT



Memória de Cálculo

Dimensionamento do Pavimento Flexível - Método DNER

Projeto: Atualização do Projeto da Duplicação da Av. Santos Dumont
Trecho: Interseção com a Rua Dona Francisca até o Aeroporto de Joinville

O. S.: Projeto 01208
Município: Joinville - SC
Data: Agosto de 2012

Dados:

Parâmetro de tráfego:

$$N = 2,0 \times 10^7$$

Camadas e materiais:

Revestimento: CAUQ - Faixa C	KR = 2,00
Binder: CAUQ - Faixa B	KR = 2,00
Base: Brita Graduada	KB = 1,00
Sub-base: Macadame Seco	KS = 1,00 CBR = 20 %
Reforço: Pedra Pulmão c/ Brita	Kref = 1,00 CBR = 10 %
Subleito natural do terreno	CBR (representativo) = 4,0 %

Resultado:

R =	4,0 cm
R =	6,0 cm
B =	15 cm
h ₂₀ =	20 cm
h _n =	30 cm
h total =	75,0 cm

Fonte: Azimute Engenharia.